

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**SROVNÁNÍ SPEKTER A SMĚROVÝCH CHARAKTERISTIK
DVOUPLÁTKOVÝCH NÁSTROJŮ**

COMPARISON OF SPECTRUM AND DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF DOUBLE REED
INSTRUMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Cočev

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Jiří Cočev

ID: 171571

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Srovnání spekter a směrových charakteristik dvouplátkových nástrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Mechanicky změřte a popište fagot, hoboj, anglický roh, duduk, zurnu a další nástroje (varhanní píšťaly), zaměřte se zejména na vnitřní tvar píšťaly a na tvrdost a rozměry strojky. Poté změřte spektrum a směrovost nástroje s různě tvrdými i rozměrnými strojkami – dvojplátky.

Proveďte spektrální analýzu (FFT, LPC) a analýzu směrovosti. Speciálně se zaměřte na formantové oblasti vzhledem ke kepstru. Data vyhodnoťte a dejte do vzájemných relací. Zvláště mezi jakostí dvouplátek vůči spektru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] GEIST, B. Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.

[2] SYROVÝ, V. Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje analýze zvukových signálů dvouplátkových dechových hudebních nástrojů. Práce se dále zabývá podrobněji vlastnostem strojku a tomu, jak vlastnosti strojku ovlivní zvukový charakter nástroje. K popisu signálů bylo využito FFT, LPC, autokorelace a kepsrální analýzy. V závěru pak práce nabízí možnosti dalšího výzkumu dvouplátkových hudebních nástrojů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Alikvoty, Autokorelace, Dvouplátky, Fagot, FFT, Formanty, LPC, Spektrum, Strojek

ABSTRACT

The Bachelor's thesis deals with analysis of the sound signals of double reed wind musical instruments. Research focuses mainly on properties of the reed and how properties of reed affects the overall sound of the instrument. For the description of the signals were used FFT, LPC, Autocorrelation and Cepstral analysis. In conclusion, the thesis offers possible future direction for the experimental research of double reed wind musical instruments.

KEYWORDS

Aliquots, Autocorrelation, Doublereeds, Bassoon, FFT, Formants, LPC, Spectrum

COČEV, Jiří. *Srovnání spekter a směrových charakteristik dvouplátkových nástrojů*. Brno, 2021, 59 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Srovnání spekter a směrových charakteristik dvouplátkových nástrojů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi Ph.D. za příkladné vedení, komunikaci, pohotovost, trpělivost a velkou ochotu při vedení mé práce. Také bych rád poděkoval doc. Mgr. Romanu Novozámskému, vedoucímu katedry dechových nástrojů na JAMU, který pro účely této práce poskytl strojky vlastní výroby, poskytl cenné poznatky a informace o těchto strojcích a nahrál zvukové vzorky fagotu, které byly v této práci zpracovávány.

Brno

.

podpis autora

Obsah

Úvod	10
1 Dvouplátkové hudební nástroje	11
1.1 Technické parametry dvouplátků	11
1.1.1 Hoboj	11
1.1.2 Anglický roh	12
1.1.3 Fagot	13
1.2 Tón dvouplátků	14
1.2.1 Strojek	14
1.2.2 Píšťala	15
1.2.3 Další faktory ovlivňující zvuk nástroje	17
2 Zpracování signálu - zvuku nástroje	18
2.1 Barva zvuku	18
2.2 Rozklad signálu na harmonické složky	19
2.2.1 Diskrétní Fourierova transformace	20
2.2.2 Rychlá Fourierova transformace	21
2.2.3 Lineární prediktivní kódování	22
2.2.4 Autokorelace	22
3 Strojek	23
3.1 Doba otevření	23
3.2 Střída	23
3.3 Spektrum	23
3.4 Autokorelace a kepsrum	24
3.5 Aplikace na reálný signál nástroje	26
4 Měření dvouplátků a analýza naměřených dat	28
4.1 Příprava měřicího řetězce	28
4.1.1 Umístění měřících mikrofónů	29
4.2 Implementace analytických nástrojů v Matlabu	30
4.2.1 Váhovací okna	30
4.2.2 FFT a úprava zobrazení frekvenčního spektra	31
4.2.3 Implementace LPC	32
5 Náběr vzorků	34
5.1 Použitá technika, způsob snímání, technické parametry	34
5.2 Postup nahrávání a postprodukce	34

6	Vyhodnocení výsledků	35
6.1	Stanovení metod a kritérií	35
6.1.1	Střída a doba otevření strojku	35
6.1.2	Rezonance ve strojku	35
6.2	Přehled strojků	36
6.3	Vyhodnocení strojků	39
6.3.1	Diskuse o době otevření	39
6.3.2	Jakost strojku	42
6.3.3	Hloubka střídy, rezonance strojku	47
7	Rekapitulace výsledků zkoumání a analýzy	52
7.1	Střída a doba otevření strojku	52
7.2	Tvrdost strojku	52
7.3	Návaznost práce	53
	Závěr	55
	Literatura	56
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	58

Seznam obrázků

1.1	Strojky hoboje	11
1.2	Hoboj a jeho popis	12
1.3	Anglický roh	13
1.4	Fagot	13
1.5	Reálný signál hoboje	15
1.6	Kmitání vzduchu v kónické trubici	16
2.1	Signál a spektrum	18
2.2	Rozklad signálu na harmonické složky	19
2.3	Spektrum signálu z obr. 2.2	20
2.4	Modulové frekvenční spektrum a spektrální obálka	22
3.1	Amplitudové spektrum pulzu	24
3.2	Autokorelace pulzního signálu	25
3.3	Kepstrum pulzního signálu	25
3.4	Autokorelace duduku	26
3.5	Porovnání spekter reálného nástroje a vymodelovaného strojku	27
4.1	Směrové charakteristiky mikrofónů	28
4.2	Aplikace Hannova váhovacího okna	30
4.3	Spektrum signálu $y(n)$	30
4.4	Spektrum signálu $y(n)*w(n)$	31
4.5	Zrcadlené a nezrcadlené spektrum	32
4.6	Modulové kmitočtové spektrum	32
4.7	Obálka spektra	33
6.1	Měřené strojky - různé omotávky	36
6.2	Strojek s popisky	37
6.3	Spektra strojku 1a	38
6.4	Spektra strojku 1b	38
6.5	Porovnání autokorelací tónu G strojku 2 a simulovaného signálu	40
6.6	Graf závislosti střídy na délce periody	41
6.7	Porovnání spekter tónu c s různými strojkami	43
6.8	Porovnání spekter tónu velké C s různými strojkami	43
6.9	Plugin ekvalizér F6 od Waves	44
6.10	Porovnání spekter tónu c'' s různými strojkami	45
6.11	Rezonanční módy strojku	47
6.12	Porovnání autokorelace a spektra tónu c'' strojku 1	48
6.13	Porovnání autokorelace a spektra tónu c'' strojku 6	48
6.14	Porovnání autokorelace a spektra tónu g' strojku 5	49
6.15	Nafukování	50

6.16	Náčrtek zvlnění strojku vlivem maximálních amplitud	51
------	---------------------------------------------------------------	----

Úvod

Předmětem zkoumání této bakalářské práce je analýza zvuku dvouplátkových dechových nástrojů v závislosti na různých mechanických vlastnostech. V práci jsou uvedeni a popsáni zástupci dvouplátkových nástrojů. Těmito zástupci jsou tradiční hoboje, anglický roh a fagot, kteří jsou běžnou součástí obsazení symfonického orchestru, ale také je zde zmíněn zástupce spíše exotických dvouplátků duduk. Později byl pro podrobnou analýzu vybrán pouze jeden z těchto nástrojů, a to fagot.

V první kapitole bakalářské práce jsou popsány tyto nástroje z hlediska tvaru, rozměrů, materiálu a dalších parametrů. Je zde popsán strojek, co to je, z čeho se vyrábí, jaké může mít mechanické vlastnosti a jak se tyto vlastnosti projeví ve zvuku nástroje. Práce také popisuje, jaké mají dvouplátkové dechové nástroje zvukové vlastnosti z hlediska teoretických předpokladů. V šesté kapitole jsou tyto teoretické předpoklady konfrontovány s výsledky měření a výsledky analýzy.

K analýze naměřených dat, neboli zvuků dvouplátků, bylo využito různých nástrojů, jako například diskrétní Fourierovy transformace nebo lineárního prediktivního kódování (LPC) a autokorelace. Teoretický úvod do analýzy signálů byl popsán ve druhé kapitole. Implementace těchto nástrojů byla provedena v prostředí matlab a autokorelace v programu audacity.

Kapitola třetí je věnována strojku, jak vypadá jeho časový průběh, jak se jakost strojku projeví na tomto průběhu, jaká je souvislost mezi frekvenčním spektrem strojku a jeho časovým průběhem. V rámci tohoto popisu byl vygenerován pulzní signál, který by měl průběh strojku simulovat. Tento signál byl podroben autokorelaci, keprstrální a spektrální analýze. Výsledky byly dány do vzájemných souvislostí a porovnány s výsledky stejných nástrojů aplikovaných na reálný zvuk dvouplátkového nástroje.

Čtvrtá kapitola se věnuje přípravě měřicího a analytického řetězce. Je zde popsáno, co by mělo být splněno pro správný sběr dat tak, aby měla data vypovídající hodnotu. Je zde popsána funkce skriptů v prostředí matlab, které slouží ke spektrální analýze nahrávek. Dále je zde také uvedeno, jak tyto skripty fungují a jaké úpravy musely být provedeny, aby kvalita výsledků odpovídala předpokladům.

Pátá kapitola se věnuje průběhu nahrávání, konkrétnímu technickému řešení a postupu. Šestá kapitola se věnuje analýze, dedukci a porovnávání. Jsou zde aplikované všechny postupy analýzy, které byly stanoveny v teoretické části. Výsledky jsou porovnávány s daty, která jsou o strojcích známa. Data poskytl výrobce a interpret v jedné osobě, který nahrál zvukové vzorky fagotu pro tuto práci. Je zde posuzováno, jak lze rozpoznat kvalitu a vlastnosti strojku z autokorelace, Fourierovy transformace a dalších analytických metod. Sedmá kapitola se věnuje závěrům celé práce.

1 Dvouplátkové hudební nástroje

1.1 Technické parametry dvouplátků

Dvouplátkové hudební nástroje, zkráceně dvouplátky, jsou nástroje dřevěné dechové. Pro všechny tyto hudební nástroje je příznačné, že mají takzvaný strojek. Strojek je malý mechanismus, který obsahuje dva velice tenké prohnuté plátky, které jsou spolu s kovovou trubičkou k sobě svázány. Kovová trubička je vložena do korku, který drží strojek v ústí nástroje a otvor neprodyšně utěsní. Strojek je vrchní díl těchto nástrojů a je to část, která je přímo spojena s ústy hudebníka. Strojek je mechanismus, ve kterém vzniká za pomoci proudícího vzduchu zvuk nástroje.



Obr. 1.1: Strojky hoboje. Převzato z [12].

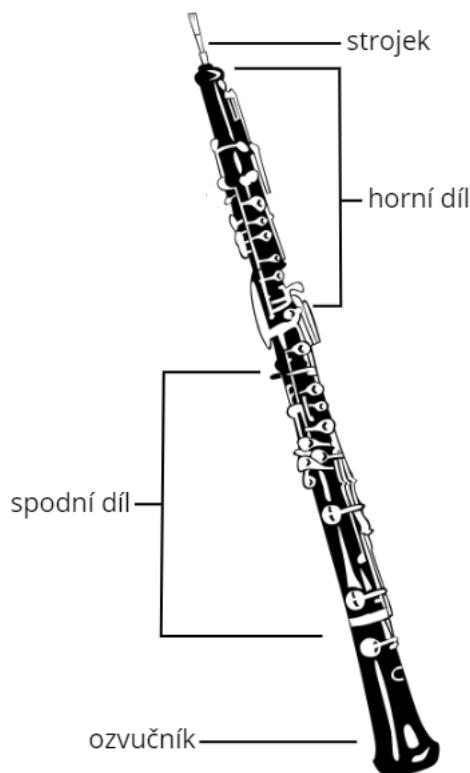
1.1.1 Hoboj

Hoboj je nejtypičtější zástupce dvouplátků. Vzhledově si jej mnozí pletou s klarinetem, ale pro znalé jsou rozdíly jak ve vzhledu, tak hlavně ve zvuku zřejmé. Hoboj se skládá z několika částí, což lze vidět na obr. 1.2. Předchůdcem hoboje je středověký šalmaj. Hoboj je spolu s dalšími dvouplátky, anglickým rohem a fagotem, součástí běžného obsazení symfonického orchestru.

Hoboj je vyráběn nejčastěji ze dřeva grenadill, kterému se také jinak říká Mosambický eben. Jde o velmi těžké a tvrdé dřevo.[1] Dnes se ale hoboje vyrábí z různých náhražek, jako třeba z plastu. Díky jiné struktuře, gramáži materiálu a jiným mechanickým vlastnostem tak vznikají trochu odlišné barvy zvuku nástroje. Důvod alternativních materiálů není ani tak experimentování se zvukem, jak cenová dostupnost a lehčí údržba nástroje. Strojek hoboje se vyrábí ze zdřevnatělé trstě rákosovité.

Existují dva typy hoboje, které se liší rozložením klapek a také svojí velikostí a tvarem. Těmito typy jsou německý a francouzský hoboj. V dnešní době je běžnější

hoboj francouzský, použití německého hoboje je spíše raritou. Hoboje jsou kónicky, neboli kuželově vrtané, tzn. že se vnitřní průměr postupně rozšiřuje. Kuželové vrtání podporuje sudé harmonické složky, což má za následek charakteristickou a vyčnívající barvu, která má nosovkový charakter. Válcovité vrtání nástroje naopak sudé harmonické potlačuje, což lze vidět například u klarinetu nebo příčné flétny. Více používaný francouzský hoboj je dlouhý zhruba 65cm.[1]



Obr. 1.2: Hoboj a jeho popis.

Hoboj je laděný v C, to znamená, že nota zapsaná v houslovém klíči bude znít stejně na hoboji, jako je napsaná v notách. Jeho tónový rozsah je nejčastěji od malého *b* až po *a*₃ což odpovídá cca 233Hz - 1660Hz.

1.1.2 Anglický roh

Dalším zástupcem orchestrálních dvouplátků je anglický roh. Jeho rozsah je psán od malého *h* až po *f*₃, ale je laděný v F, takže zní o kvintu níže. To znamená, že jeho rozsah je od malého *e* zhruba dva a půl oktávy nahoru, to je cca 165Hz - 932Hz.[1]

Anglický roh vypadá jako delší hoboj, dokonce se používá stejný prstoklad, ale na konci má obvykle hruškovitý ozvučník viz obr. 1.3. Uvnitř je nástroj kuželově vrtaný

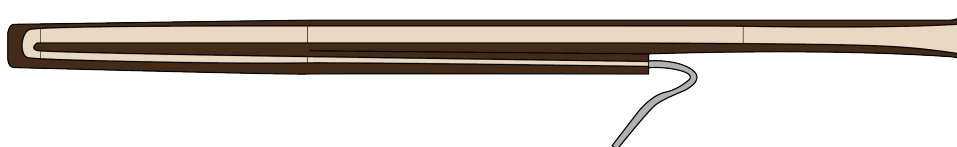
a je přibližně jeden a půlkrát delší než hoboje. Anglický roh má měkčí a jemnější zvuk než hoboje, i když se na něj používají ty samé strojky.[2]



Obr. 1.3: Anglický roh. Převzaté z [13].

1.1.3 Fagot

Fagot je největší z uvedených dvouplátkových nástrojů. Jde o basový nástroj, s rozsahem od kontra B po d_2 . To odpovídá frekvenčnímu rozpětí 58Hz - 587Hz. Délka fagotu je zhruba 140cm. Délka vzduchového sloupce je ale 254cm. To je dáno ohybem o 180 stupňů ve spodní části nástroje viz obr. 1.4.[3]



Obr. 1.4: Průřez fagotem. Překreslené z [4].

Vnitřní tvar fagotu je kuželovitá, neboli kónická trubice, která se postupně rozšiřuje. V nejužším místě trubice má vnitřní průměr 4mm a ústí ozvučníku je široké 40mm. Na výrobu fagotu se používá nejčastěji javorové dřevo, které je měkčí než grenadill, ze kterého se vyrábí hoboje a anglický roh. Mezi strojkem a dřevěnou částí nástroje se nachází zahnutá kovová trubice, které se říká eso. Eso má také kónický vnitřní tvar a na jeho konec je připevněný strojek. Strojek fagotu je větší než strojek hoboje.[4]

1.2 Tón dvouplátků

U dvouplátků je „tvůrce“ zvuku strojek, který obsahuje dva tenké plátky. Zvuk ve strojku vzniká periodickým rozkmitáním těchto plátků pomocí proudu vzduchu proudícího z úst do strojku. [4]

Různé části hudebních nástrojů mají různé funkce co se tvorby tónu týče. Každá tato funkce velmi ovlivňuje výsledný tón hudebního nástroje dvouplátků nevyjímaje. Tyto funkce jsou uvedeny níže.

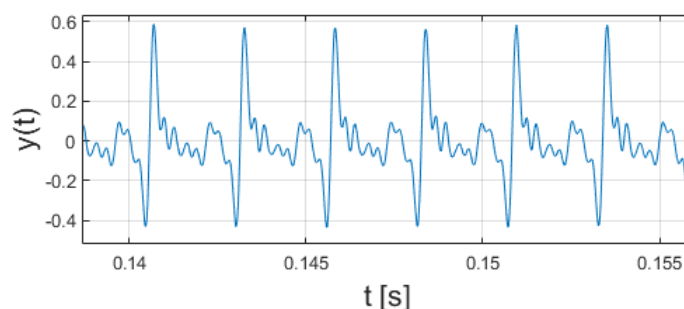
- **Excitátor** - dodává nástroji energii ke kmitání, a tím i k tvorbě tónu. U bicích nástrojů jsou to paličky, u kytary jsou to prsty nebo trsátko, u smyčcových nástrojů je to smičec a u žestových dechových nástrojů jsou excitátorem rty. Excitátorem dvouplátkových hudebních nástrojů je vzduch, který rozkmitává strojek.
- **Oscilátor** - je kmitající součást, která udává svou základní periodou kmitání výšku tónu. Například, u strunných nástrojů je oscilátorem struna, kdy výšku tónu udává délka kmitající části, ale u dvouplátkových hudebních nástrojů je oscilátorem strojek a výšku tónu určuje délka vzduchového sloupce. Tato délka se ovlivňuje otvíráním a zavíráním klapek nástroje.
- **Rezonátor** - jsou ty části nástroje, které přebírají energii od oscilátoru a nějakým způsobem rezonují, a tím ovlivňují výslednou barvu nástroje. U dvouplátkových nástrojů, stejně jako snad u všech akustických nástrojů, je rezonátorem tělo nástroje.
- **Radiátor** - hudebního nástroje, je ta část nástroje, kterou zvuk vychází do prostoru. V případě dřevěných dechových nástrojů, dvouplátkových nevyjímaje, je radiátorem ozvučník a každá otevřená klapka nebo neucpaný otvor. [5]

1.2.1 Strojek

Strojek, z hlediska zvukové vlny, funguje po dodání energie excitátorem (vzduchem) jako generátor pulzů. Zvuková vlna dvouplátků má tak tvar periodicky opakujících se pulzů nebo obdélníkového signálu. Důležitým parametrem obdélníkového signálu je střída. Střída udává, v jakém poměru jsou fáze sepnuto ku vypnuto. Pokud je střída 1:1, pak je fáze zapnuto a vypnuto stejně dlouhá. Základní perioda tohoto obdélníkového nebo pulzního signálu odpovídá výšce tónu nástroje. Na obr. 1.5, kde je zobrazen reálný časový průběh tónu hoboje, je vidět, že součástí signálu jsou opravdu periodicky opakující se pulzy. Další prokmity jsou tvořeny rezonancí vzduchového sloupce a materiálu nástroje. [6]

Strojky se dále dělí podle tvrdosti. Tvrdost má několik stupňů od měkkého, přes střední, až po tvrdý. Čím jsou plátky více vybroušeny, tím jsou měkkší a naopak.

Měkký strojek je hbitý a kmitá lépe než strojek, který je tvrdý.



Obr. 1.5: Reálná zvuková vlna hoboje o frekvenci 390Hz.

Strojku se podrobněji věnuje kapitola 3.

1.2.2 Píšťala

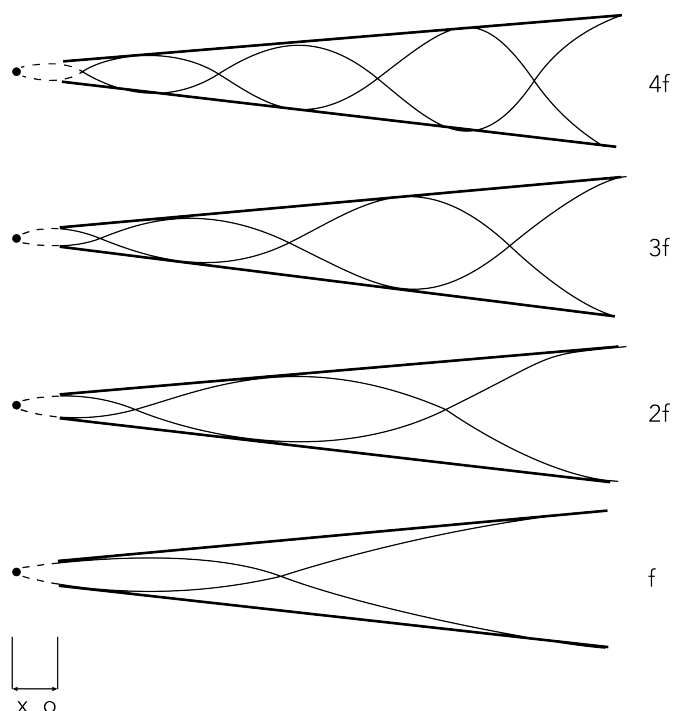
Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje výsledný zvuk nástroje, je vnitřní tvar jeho píšťaly. Hoboj, anglický roh a fagot mají shodně kónický vnitřní tvar, to už bylo zmíněno v kapitolách o těchto nástrojích.

V trubici nástroje (v píšťale) se nachází vzduchový sloupec. Excitátor, v našem případě proudící vzduch z úst hráče, dodá energii oscilátoru - dvouplátku, a tím ho rozkmitá. Oscilátor tím předává energii vzduchovému sloupci a vzniká tón. Proto, aby vznikl tón, musí uvnitř píšťaly dojít ke stojatému vlnění. To vznikne tak, že vlna šířící se od oscilátoru dojde až ke spodnímu konci otvoru trubice. Tam dochází ke změně impedance díky náhlé změně průřezu trubice (otvor vede ven). Díky této změně impedance se vlna odrazí a sečte se s vlnou přímou. V trubici pak vzniknou kmitny a uzly viz obr. 1.6 a nástroj začne vydávat tón. Kmitny jsou místa, kde amplituda dosahuje maximální úrovně a uzly jsou místa, kde nedochází ke změně výchylky. Proto, aby vzniklo stojaté vlnění, musí být splněna takzvaná okrajová podmínka:

$$f_n = n \frac{c}{2l} \left(1 - \frac{x_0}{l}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (1.1)$$

Kde n je celé číslo, c je rychlost zvuku, l je délka kuželového zvukovodu a x_0 je délka pomyslného vrcholu kuželu, kterou lze vidět na obr. 1.6. Frekvence, které nesplňují tuto rovnici, vycházejí ven, místo toho, aby se odrazily. Nevzniká tak stojaté vlnění a v důsledku toho nevzniká ani tón.[7]

Na rozdíl od válcových trubic, ve kterých se tlakový rozruch šíří konstantní rychlostí přibližně v rovinných vlnách, se v kuželovém zvukovodu (v závislosti na jeho tvaru) šíří ve skutečnosti vlna spíše kulová. Změna průřezu má za následek též změnu



Obr. 1.6: Kmitání vzduchu v kónické trubici a výška kuželu x_0 . Překresleno z [7].

rychlosti šíření zvuku (přesněji fázové rychlosti zvuku), a proto se kuželový vzdušný sloupec chová jako na obou koncích otevřený.[7]

Všechny dřevěné dechové nástroje mají ve svém těle otvory, které se zakrývají prsty nebo klapkami. Otvory se odkrývají postupně od spodu. Když se otvor otevře, to znamená, že není zakryt ani prstem, ani klapkou, vzduch otvorem začne unikat. Tím dojde ke zkrácení vzduchového sloupce, který kmitá. Zkrácením dojde k rostoucí změně kmitání. Frekvence tak stoupá, to znamená, že nástroj vydává vyšší tón. [7]

Jak už bylo zmíněno, zásadní vliv na zvuk nástroje má vnitřní vrtání nástroje. To se však špatně měří, protože lze jen těžko odhadnout tento tvar. Můžeme k tomu použít takzvaných Besselových funkcí, které nám pomohou aproximovat vnitřní průměr nástroje:

$$r(x) = \frac{b}{(x + x_0)^\gamma} \quad [\text{m}]. \quad (1.2)$$

Kde r je poloměr vrtání trubice v x , b je konstanta zohledňující počáteční a konečný průměr zvukovodu, x_0 je vrchol zvukovodu, x je proměnná délková souřadnice a γ je poměr rozšiřování zvukovodu. b získáme:

$$b = \left(\frac{d}{R_0^{-1/\gamma} - R_1^{-1/\gamma}} \right)^\gamma \quad [-]. \quad (1.3)$$

Zde je d délka zvukovodu, R_0 poloměr trubice na vstupu a R_1 je poloměr na konci trubice. Vrchol zvukovodu x_0 vypočítáme jako:

$$x_0 = - \left(\frac{R_0}{b} \right)^{-1/\gamma} \quad [\text{m}]. \quad (1.4)$$

Poměr rozšiřování zvukovodu γ má různé hodnoty pro různé typy zvukovodů. $\gamma = 0$ pro válcový zvukovod, $\gamma = -1$ pro kuželový zvukovod, a například trubka a trombon mají rozšiřování zvukovodu nabývající hodnot $\gamma = 0,5$ až $0,65$. [7]

Tyto znalosti se dají dále využít k výpočtu rezonančních módů nástroje. Pro rezonanční módy Besselových zvukovodů platí přibližný vztah:

$$f_n \approx \left(\frac{c}{4l + 4x_0} \right) \left[(2n - 1) \beta \sqrt{\gamma(\gamma + 1)} \right] \quad [\text{Hz}]. \quad (1.5)$$

Kde l je délka zvukovodu a $\beta = 0,6$ pro $\gamma < 0,8$ a $\beta = 0,7$ pro $\gamma > 0,8$. Tyto módy spoluutváří výsledný zvuk, ovlivňují formanty, přidávají inharmonicity a ovlivňují šířku spektra. [7]

1.2.3 Další faktory ovlivňující zvuk nástroje

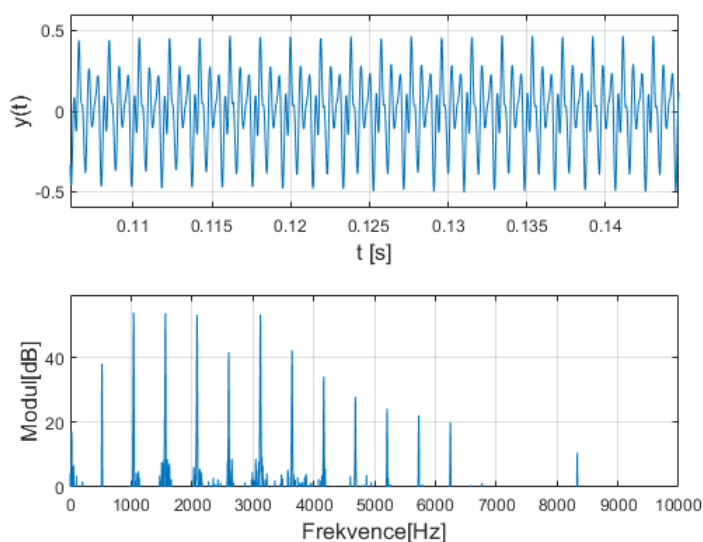
Velmi důležitým činitelem ovlivňujícím tón nástroje je především technická zdatnost muzikanta. Žádný nástroj, ať je sebelepší a jeho konstrukce nemá chybu, nemůže nahradit nedokonalosti vzniklé technickými nedostatky interpreta. Z těchto technických dovedností je pro tvorbu tónu nejkritičtější správný nátisk. Nátisk je přiložení úst ke strojku. Správný nátisk je výsada zdatných interpretů a obecně u dvouplátků platí, že získat správný nátisk je těžší než u jiných dechových nástrojů.

Dalšími faktory ovlivňujícími zvuk nástroje mohou být například vlhkost a teplota prostředí, které ovlivňují zejména stabilitu ladění nástroje, ale i schopnost nástroje rezonovat.

2 Zpracování signálu - zvuku nástroje

Proto, aby se dalo zabývat tím, jak ovlivňují barvu a kvalitu zvuku různé mechanické vlastnosti dvouplátkových dechových nástrojů nebo jejich strojků, je potřeba snímaný zvuk nástroje zpracovat. Základní zpracování zvuku je převedení časového průběhu signálu na frekvenční spektrum.

Pro získání spektra z časového průběhu signálu (předem nahraného tónu nástroje) se využívá matematického nástroje Fourierovy transformace. Jakým způsobem mechanické vlastnosti ovlivňují výsledný zvuk zjistíme porovnáním těchto frekvenčních spekter. Ty se získají například tak, že se zahraje dvakrát na stejný nástroj stejný tón, pokud možno ve stejné kvalitě, ale vždy se strojkem s jinými mechanickými vlastnostmi. To, jak se výsledné frekvenční spektrum v závislosti na těchto mechanických vlastnostech vybraných strojků změní, je pak předmětem dalšího zkoumání v následujících kapitolách.



Obr. 2.1: Diskrétní signál hoboje tónu c_2 a jeho frekvenční spektrum.

2.1 Barva zvuku

Je nutné si v rámci analýzy hudebně zvukového signálu zavést pojem *barva zvuku* a *barva tónu*.

Barva zvuku resp. tónu je určena počtem a intenzitou jednotlivých harmonických složek. U tónů hudebních nástrojů jsou poměry intenzit jednotlivých složek spektra na absolutní výšce těchto složek nezávislé. U vokálů je barva určena existencí jedné

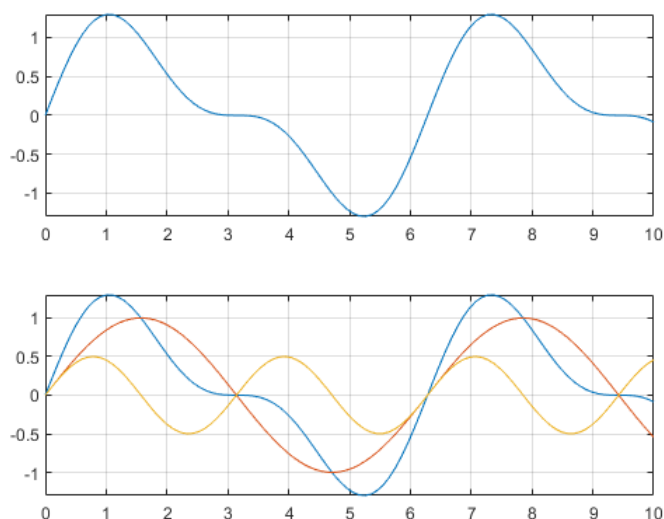
nebo dvou charakteristických harmonických složek, které jsou ve zvuku zdůrazněny. Poloha těchto složek je pevně spojena s jejich absolutní výškou.[7]

Barva zvuku je popisována nejen matematicky, ale i vzhledem k psychoakustice. Různým poměrům intenzit harmonických složek jsou dávány různá pojmenování, která říkají, jak lidský mozek tyto poměry vnímá. Tyto pojmenování mají širokou škálu, například hebká, tenká, teplá, studená, plná, ostrá nebo tupá barva zvuku a mnoho dalších.

2.2 Rozklad signálu na harmonické složky

Rozklad signálu na harmonické složky, který je naznačen na obr. 2.2, je docílen pomocí Fourierovy transformace, dále jen FT. Harmonické složky jsou dílčí harmonické signály ve tvaru sinusovky, které při sečtení vytvoří rekonstruovaný původní signál. Soubor těchto harmonických složek se nazývá Fourierova řada. V případě, že je takto analyzovaný signál periodický, jsou vyšší harmonické složky celočíselným násobkem první harmonické. [8]

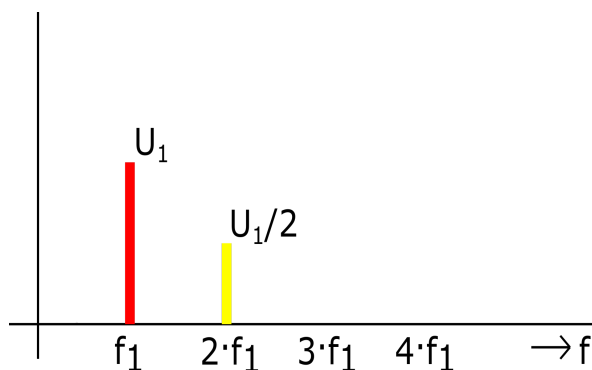
První harmonická je harmonická složka, která má sinusovku s nejdelší periodou. Této složce se také říká Fundament. Ostatní harmonické složky, jejichž frekvence je celočíselným násobkem fundamentu, jsou nazývány vyšší harmonické, nebo také alikvotní tóny, zkráceně alikvoty.



Obr. 2.2: Rozklad signálu na harmonické složky.

Při pohledu na Obr. 2.2 je na horním grafu vidět původní analyzovaný signál. V dolním grafu jsou vidět 3 křivky, modrá, reprezentující původní signál, červená a

žlutá křivka - sinusovky - harmonické složky, ze kterých se původní signál skládá. Je vidět, že signál se skládá ze dvou harmonických složek, z čehož vyplývá, že i spektrum tohoto signálu bude mít dvě harmonické složky. Je také vidět, že červená sinusovka má dvakrát větší periodu a amplitudu než žlutá sinusovka. Z toho plyne, že červená sinusovka je fundament signálu a žlutá je alikvotní tón. Spektrum takového signálu pak bude vypadat dle obr. 2.3. Reálný tón reálných hudebních nástrojů má samozřejmě více vyšších harmonických v různých poměrech, kromě toho má i určitý podíl šumové složky a inharmonicit.



Obr. 2.3: Signál z obr. 2.2 rozložený na harmonické složky.

2.2.1 Diskrétní Fourierova transformace

Fourierova transformace pracuje se signály, které jsou spojité v čase. V dnešní době se signály zpracovávají především v digitální formě. Signály jsou tedy diskrétní v čase. Na takové signály FT nejde použít, proto byla zavedena takzvaná *Diskrétní Fourierova transformace* (DFT), která pracuje s diskrétními signály.

Pro odvození vztahu pro výpočet kmitočtového spektra diskrétních signálů je potřeba si nejdříve uvést tento vztah pro spojité periodické signály:

$$X(k) = \frac{1}{T} \int_{-1/T}^{1/T} x(t) e^{-j\omega kt} dt. \quad (2.1)$$

Úsek o délce T navzorkujeme počtem N vzorků a zavedeme substituci do vztahu:

$$X(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j\omega kt} dt. \quad (2.2)$$

substituce bude vypadat takto:

$$T = NT_{vz}; \quad dt = T_{vz}; \quad x(t) = x(n); \quad \int_0^T = \sum_{n=0}^N; \quad T = nT_{vz}. \quad (2.3)$$

Po dosazení dostaneme:

$$X(k) = \frac{1}{NT_{vz}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega knT_{vz}T_{vz}}. \quad (2.4)$$

Úpravou úhlové frekvence ω a matematickou úpravou dostaneme přímý vztah pro DFT:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.5)$$

kde n představuje odpovídající vzorek v čase a k představuje odpovídající vzorek v kmitočtu. Výsledkem DFT je posloupnost komplexních spektrálních koeficientů $X(k)$. Ty jsou nejčastěji zobrazovány jako modulová kmitočtová charakteristika. Modul je absolutní hodnota spektrálních koeficientů v logaritmickém měřítku.[9][8]

Aby DFT proběhlo v pořádku, musí být dodržen takzvaný Nyquistův, neboli vzorkovací teorém:

$$f_{max} \leq \frac{f_{vz}}{2}. \quad (2.6)$$

f_{vz} je vzorkovací frekvence, f_{max} je maximální frekvence, která se v signálu nachází. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, docházelo by k aliasingu, což je nežádoucí jev ve spektru.[8][9]

Protože se tato práce zabývá hudebně zvukovými signály, tak se pracuje se signály, které mají maximální frekvenci cca 20kHz. 20kHz je pro lidské ucho hranice slyšitelnosti, takže vyšší frekvence lze v analýze hudebního signálu nebrat v úvahu. V hudebních záznamech se používají nejčastěji vzorkovací frekvence 44,1kHz, 48kHz a 96kHz.

2.2.2 Rychlá Fourierova transformace

Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation - FFT) je algoritmus pro efektivní, ale jak z názvu plyne, tak hlavně rychlý výpočet DFT.

Výhoda FFT oproti DFT je především v počtu výpočetních operací. Zatím co k výpočtu DFT potřebujeme N^2 operací násobení, což vychází z definice vztahu pro výpočet DFT, tak pro FFT potřebujeme pouze $\frac{N}{2}\log_2 N$ operací násobení. Když se počty operací dají do poměru, tak vyjde pro počet vzorků $N = 16$:

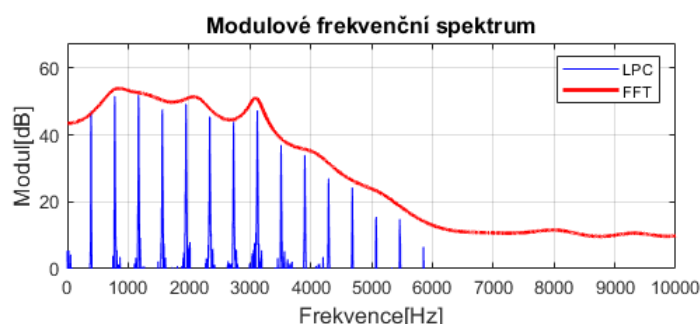
$$\alpha = \frac{N^2}{\frac{N}{2}\log_2 N} = \frac{2N}{\log_2 N} = 8. \quad (2.7)$$

Z toho vyplývá, že pro FFT algoritmus potřebujeme 8 krát méně operací násobení než pro přímou DFT.[8]

2.2.3 Lineární prediktivní kódování

Lineární prediktivní kódování (Linear predictive coding - LPC) je metoda, která se nejčastěji využívá ke zpracování řečového signálu. Hledá ve spektru signálu takzvané formanty. Tato metoda se dá použít i k analýze formantů hudebních nástrojů. Formantové oblasti, zkráceně formanty, jsou zásadními činiteli, které ovlivňují barvu zvuku. Formantová oblast má dva základní parametry: *střední frekvence* - udává, kde ve spektru se formant nachází; *šířka* - říká, kolik harmonických složek formant obsahuje.

Výstupem LPC je obálka frekvenčního spektra zkoumaného signálu. Lokální maxima spektrální obálky jsou Střední frekvence formantů.



Obr. 2.4: Modulové frekvenční spektrum a spektrální obálka.

2.2.4 Autokorelace

Další hojně používanou metodou analýzy v této bakalářské práci je autokorelace signálu. Ačkoliv přímo nepracuje s frekvenčním spektrem, tak s ním úzce souvisí. Běžná korelace pracuje se dvěma různými signály, ve kterých hledá vzájemné podobnosti. Autokorelace pak funguje jako korelace dvou shodných signálů, nebo také lze říci, korelace signálu sebou samým. Tato metoda slouží především k nalezení periodických jevů uvnitř signálu. V této práci používáme autokorelaci i k analýze střídavy signálu. Korelace signálů $f(t)$ a $g(t)$ je definována takto:

$$R = \int f * (\tau) g(t + \tau) d\tau \quad (2.8)$$

kde $*$ značí komplexní sdružení. Pro autokorelaci pak signál $g(t)$ nahradíme $f(t)$. [8]

3 Strojek

Tato práce se především věnuje analýze dvouplátkových nástrojů v závislosti na mechanických vlastnostech strojku, proto je strojku věnována celá následující kapitola.

Strojek generuje periodicky opakující se pulzy - pulzní signál. Tyto pulzy vznikají otevřením dvouplátku strojku. Důležitým parametrem takového signálu je střída. Střída v této práci udává, v jakém poměru je v signálu fáze zapnuto ku délce periody. Fáze zapnuto odpovídá otevřenému strojku, a tedy šířce pulzu.[6]

3.1 Doba otevření

Šířka pulzu strojku je čas, který odpovídá době otevření strojku. Tato doba se zhruba pohybuje v řádu 10^{-4} až 10^{-3} . Doba otevření strojku je nezávislá na vlastnostech nástroje. Je závislá pouze na mechanických vlastnostech strojku. Doba otevření strojku je navíc přibližně konstantní v celém tónovém rozsahu nástroje. Čím měkčí strojek je, tím je hbitější, a tím se doba otevření zkracuje. Naopak tvrdý strojek bude pomalý a doba otevření bude dlouhá.[6]

3.2 Střída

Střída pulzního signálu strojku je dána poměrem doby otevření ku periodě. K tomu je třeba znát šířku pulzu τ a délku jedné periody pulzního signálu T . Poměr S je pak dán vztahem:

$$S = \frac{\tau}{T} \quad [-], \quad (3.1)$$

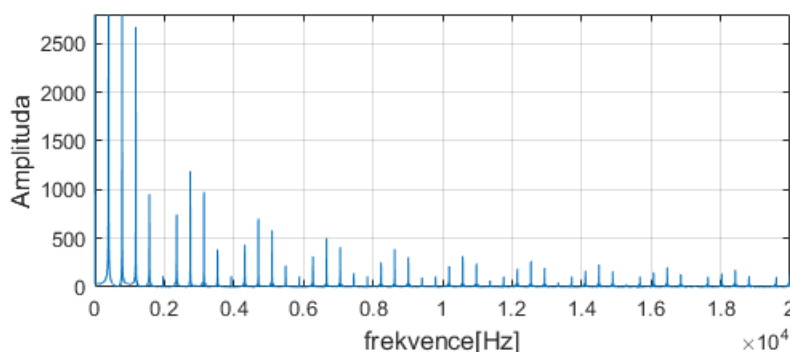
kde τ a T udávají čas v sekundách. V modelovém případě pak platí $\tau = 5,2 \cdot 10^{-4}$ a $T = 26 \cdot 10^{-4}$, což odpovídá frekvenci tónu g_1 s výškou 392Hz, v tom případě střída bude rovna 1:5.[6]

Protože je známo, že se doba otevření strojku τ v celém rozsahu nástroje nemění, pak zákonitě platí, že s rostoucí frekvencí tónu nástroje, za použití stejného strojku, bude střída klesat. Takže pokud na tónu g_1 o 392Hz je střída 1:5, tak na tónu g_2 s frekvencí 784Hz bude střída pulzního signálu už pouze 1:2,5.

3.3 Spektrum

Aby bylo možno provést analýzu strojku, byl v matlabu vytvořen kód pro generování pulzního signálu. Tento signál je simulací pulzů strojku. Signál má volitelné dva parametry, kterými jsou frekvence a šířka pulzu. Nepřímo tak lze nastavit střída signálu.

Mezi střídou a frekvenčním spektrem pulzního signálu strojku existuje přímá souvislost. Pokud je střída $1 : x$, pak ve spektru dochází k útlumu nebo úplné absenci x -té harmonické a jejích celočíselných násobků. Na obr. 3.1 je zobrazeno spektrum pulzu, který má střídu 1:5. Z toho vyplývá, že by měla být utlumena každá 5. harmonická složka.[6]



Obr. 3.1: Spektrum pulzu matlabem generovaného signálu se střídou 1:5.

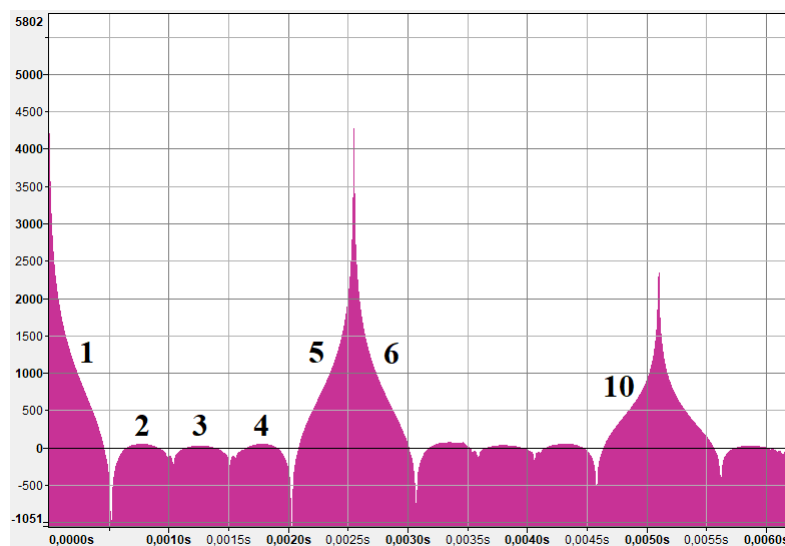
Z obr. 3.1 je také vidět, že ve spektru pulzního signálu se tvoří takzvané kaskády. To jsou formantové oblasti, které jsou ohraničeny nulovými body. Nulové body jsou právě ty harmonické, které jsou utlumeny. Kaskády mají stejnou šířku a každý další formant má menší energii než předchozí.

3.4 Autokorelace a kepstrum

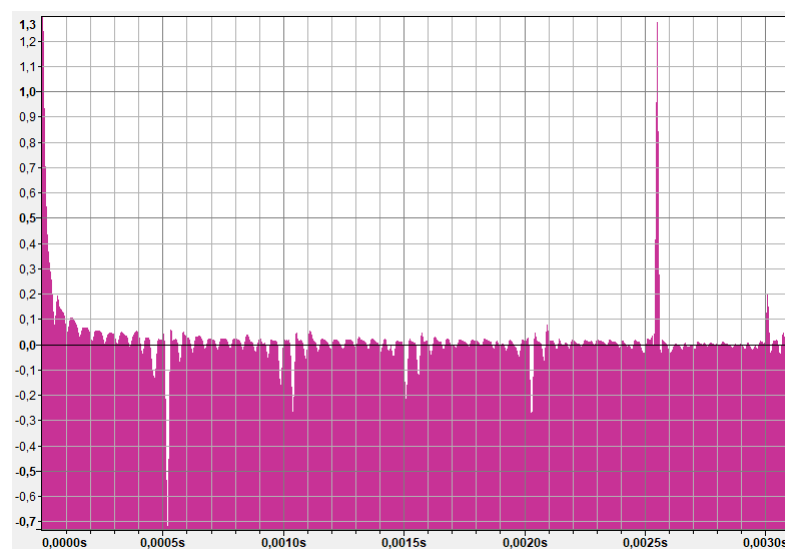
Pro další ověření vlastností signálu strojku lze použít autokorelaci. Autokorelace je korelace dvou shodných signálů, při níž se v průběhu signálu vyhledávají periodicky se opakující jevy, lze tak určit periodu signálu. Z autokorelace se dá přibližně odhadnout i střída signálu.

Na obr. 3.2 je vidět graf autokorelace vygenerovaného pulzního signálu, který má simulovat pulzy strojku s dobou otevření $\tau = 5,2 \cdot 10^{-4}$ s. Čísla 1-6 jsou naznačeny stejně dlouhé úseky. Mezi úseky 5 a 6 se nachází výrazné maximum, které označuje základní periodu analyzovaného signálu. Tato základní perioda má podle autokorelace hodnotu $T = 26 \cdot 10^{-4}$ s, to odpovídá přednastavené hodnotě. Počet těchto stejných úseků v jedné periodě je 5. To naznačuje, že poměr šířky pulzu ku periodě je 1:5, což opět odpovídá přednastavené hodnotě.

Výsledky mohou být porovnány s kepstrem. Kepstrum je reálnou složkou zpětné FFT zlogaritmovaných spektrálních koeficientů. Kepstrum by mělo zachovávat stejné poměry jako autokorelace. Toto kepstrum je zobrazeno na obr. 3.3.



Obr. 3.2: Autokorelace vygenerovaného pulzního signálu.



Obr. 3.3: Kepstrum vygenerovaného pulzního signálu.

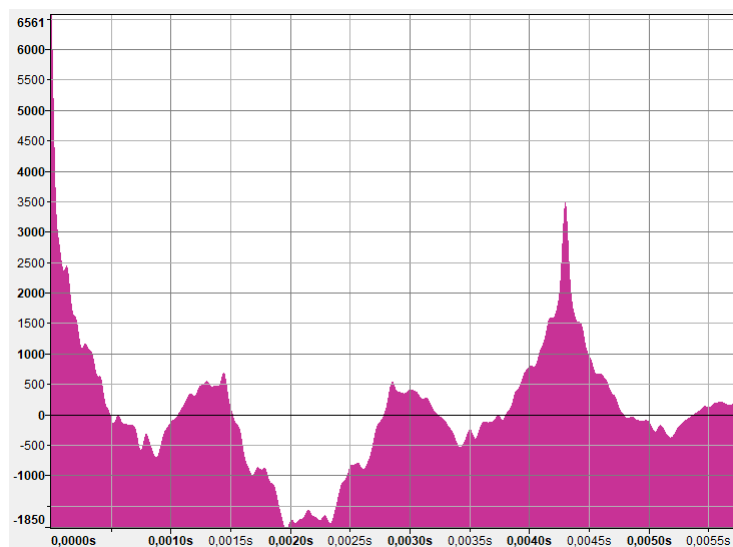
V kepru je v čase 2,6ms maximum, které označuje základní periodu signálu, stejně jako autokorelace. Kepstrum lze také rozdělit na přibližně stejné časové úseky, které definují střidu signálu a nulové body ve spektru. Tyto časové úseky lze mimo jiné rozpoznat polohou lokálních minim, které tyto úseky ohraničují.

Ke spektrální analýze byl použit FFT skript v matlabu. Pro autokorelaci a zobrazení kepru byla použita integrovaná funkce pro analýzu signálu programu Audacity.

3.5 Aplikace na reálný signál nástroje

Znalosti a informace zpracované v předešlých oddílech kapitoly 3 - strojek, lze aplikovat na analýzu tónu reálného nástroje. Některé analýzy by samy o sobě šly jen velmi těžko u reálných signálů vyhodnocovat. Proto je třeba použít podobností, které byly vyhodnoceny na generovaném pulzním signále.

Reálný signál je časový průběh tónu duduku. Tento tón má frekvenci fundamentu 232Hz (malé b). Autokorelace signálu je zobrazena na obr. 3.4.



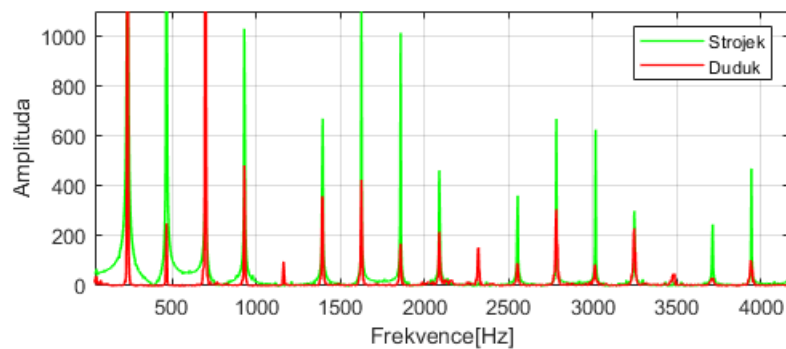
Obr. 3.4: Autokorelace tónu duduku.

Na první pohled lze vidět, že autokorelace reálného signálu není tak snadno čitelná jako autokorelace generovaného pulzu. Dobře jde z grafu určit délka periody: $T = 4,3 \cdot 10^{-3}\text{s}$. Na základě podobnosti s autokorelací generovaného signálu je možné pokusit se o rozdělení periody na stejné časové úseky. Lze odhadnout, že počet těchto úseků bude pravděpodobně roven pěti. Pokud bude délka periody podělena počtem těchto úseků, získáme předpokládanou dobu otevření strojku. V tomto případě by doba otevření mohla mít hodnotu: $\tau = T/5 = 0,86 \cdot 10^{-3}\text{s}$.

Na základě této analýzy je možné v matlabu vygenerovat pulzní signál předpokládaného strojku duduku a zobrazit spektra reálného a generovaného signálu. Tyto spektra se dají následně porovnat a dá se určit, jestli mají nějaké podobnosti, viz obr. 3.5.

Z grafu spekter 3.5 je vidět, že by se dala jistá podobnost a blízká tendence ve spektru odhadovat. Jde to ale jen velmi těžko a nelze to nijak exaktně změřit. Reálný tón duduku také ovlivňuje rezonance, inharmonicity a impedance nástroje. Přesto se některá minima shodují a formanty si jsou opticky podobné. Proto lze říci, že

se podařilo vygenerovat časový průběh strojku blížký svou dobou otevření strojku reálného duduku.



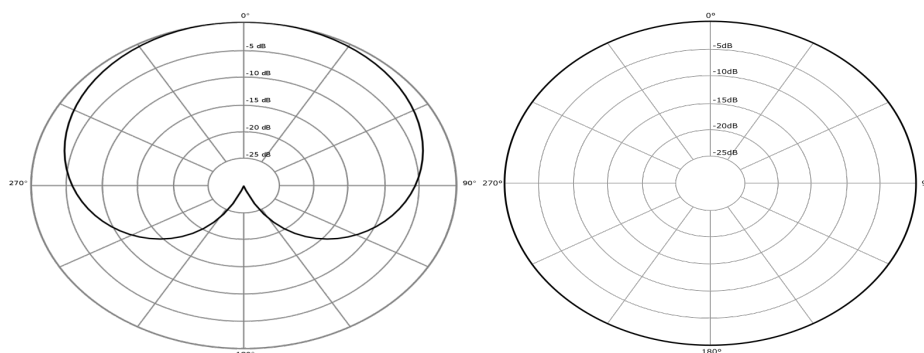
Obr. 3.5: Porovnání přiblížených spekter reálného nástroje a vymodelovaného strojku.

4 Měření dvouplátků a analýza naměřených dat

V první části práce nebylo možné uskutečnit nahrávání zvukových vzorků nástrojů, proto k analýze dat byly pro úvodní zkoumání použity demo vzorky. Vzorky hoboje, anglického rohu a fagotu byly získány vystřížením jednotlivých tónů ze souvislé edukační nahrávky převzaté z [2][3][10]. Tyto nahrávky pravděpodobně prošly před zpracováním v této práci postprodukcí. V jak moc velké míře postprodukce změnila výsledný zvuk lze jen odhadovat. Vzhledem k těmto skutečnostem bylo nutné alespoň stanovit podmínky pro budoucí náběr zvukových vzorků tak, aby byla jejich vypovídající hodnota co možná největší. Stanovení těchto podmínek a následné implementaci analytických nástrojů se podrobněji věnuje tato kapitola.

4.1 Příprava měřicího řetězce

Pravděpodobně nahrávky výše zmíněných vzorků nebyly pořízeny pomocí měřících mikrofónů, které by měly relativně vyrovnanou frekvenční charakteristiku, ale byl použit mikrofón pro studiové nahrávání, ale i to je pouze odhad. Kvalitní studiové mikrofóny od nejlepších výrobců, jako jsou například Neumann, DPA nebo Schoeps, mají velmi vyrovnanou frekvenční charakteristiku. Přesto však tato charakteristika nedosahuje vyrovnanosti i relativně levných měřících mikrofónů. Dalším rozdílem je,



Obr. 4.1: Směrové charakteristiky mikrofónů. Vlevo kardioida, vpravo kulová charakteristika.[11]

že měřící mikrofóny mají kulovou směrovou charakteristiku, to znamená, že nemají útlum z žádného směru. Kulovou směrovou charakteristiku můžou mít i studiové mikrofóny, častější jsou ale různé modifikace, jako je například směrová charakteristika

ve tvaru kardiody. Tato směrová charakteristika má útlum, který se zvětšuje s rostoucím úhlem od osy mikrofону a největší útlum je ve směru 180° . Na obr. 4.1. jsou tyto směrové charakteristiky ukázány. Jedná se o teoretické tvary, ve skutečnosti se směrová charakteristika dost zásadně mění v závislosti na frekvenci.

Z těchto důvodů byly tyto vzorky používány jen jako orientační a byla na nich vyzkoušena funkčnost systému, který byl vytvořen pro analýzu signálu zvuku dvouplátků.

Aby se dala data považovat za relevantní, je třeba, aby měření splňovalo následující podmínky. Musí být připraven celý měřicí řetězec: software DAW (Digital Audio Workstation) v počítači, k počítači připojená zvuková karta nebo A/D převodníky (tato část lze nahradit jiným nahrávacím zařízením), měřicí mikrofón nebo soustava měřících mikrofónů.

Tento řetězec musí být ideálně zkalibrován. Je třeba, aby byly správně nastaveny vzorkovací frekvence. Zvolený vzorkovací kmitočet není zase tak zásadní, pokud splňuje vzorkovací teorém, což vzorkovací frekvence běžně používané k nahrávání zvuku (44,1kHz, 48kHz, 96kHz a 192kHz) splňují. Je ale důležité, aby byl vzorkovací kmitočet na všech zařízeních nastaven stejně. Je třeba si rozmyslet umístění mikrofónů, zohlednit všechny vlivy, které snímání zvuku mohou vzhledem k pozici mikrofónu ovlivnit. Hráč, který bude hrát na měřený nástroj, musí být ideálně v konstantní vzdálenosti od mikrofónu, aby se daly vzorky mezi sebou dávat do vzájemných relací. Měření by mělo proběhnout v co možná nejvíce zatlumené místnosti, ideálně v bezodrazové komoře.

4.1.1 Umístění měřících mikrofónů

Proto, aby měření bylo na celém tónovém rozsahu nástroje s co největší vypovídající hodnotou, je potřeba správně umístit měřící mikrofón. Dřevěné dechové nástroje, ať jde o flétny, jednoplátky nebo dvouplátky, vyzařují zvuk všemi nezakrytými otvory.

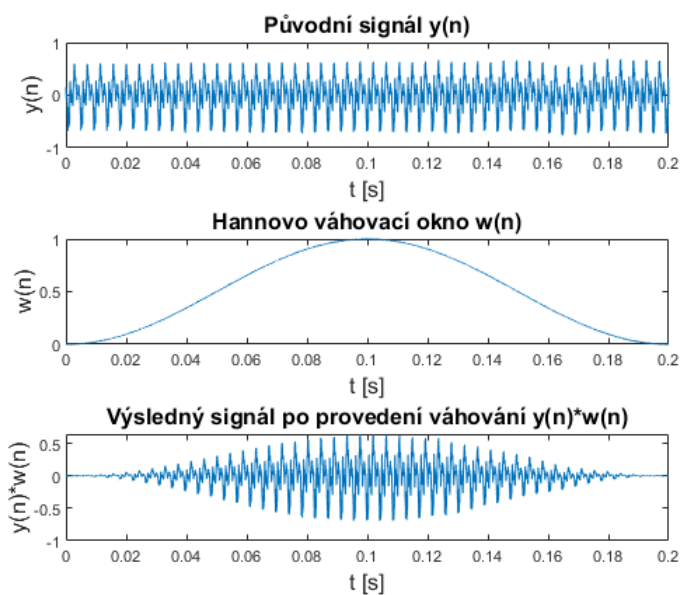
Pokud bude mikrofón umístěn přímo nad tónovými otvory nástroje, může se stát, že při zakrytí těchto otvorů nepůjde do mikrofónu žádný přímý zvuk. Mikrofón je třeba na základě toho umístit nad nástroj dostatečně daleko, aby se zvuková vlna z otevřených otvorů dokázala spojit. Nelze jej ale umístit zase příliš daleko, protože to s sebou nese další negativní faktory. Pokud není místnost, ve které probíhá měření, bezodrazová komora, tak s rostoucí vzdáleností mikrofónu od nástroje negativně roste poměr odražených vln ku přímým. Dalším negativním faktorem příliš vzdáleného snímání je, že vyšší harmonické ztrácejí se vzdáleností svoji energii, což by zkreslilo výslednou frekvenční charakteristiku a nebylo by dosaženo přesných výsledků. Není ani vhodné umístit mikrofón k ozvučníku, kde také vždy nemusíme zvukovou vlnu zachytit.

4.2 Implementace analytických nástrojů v Matlabu

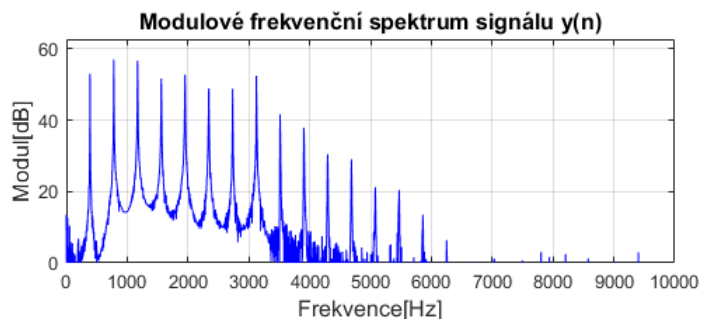
V teoretickém úvodu byl nastíněn způsob analýzy signálu. Tyto metody byly pro účely této práce implementovány v prostředí matlab.

4.2.1 Váhovací okna

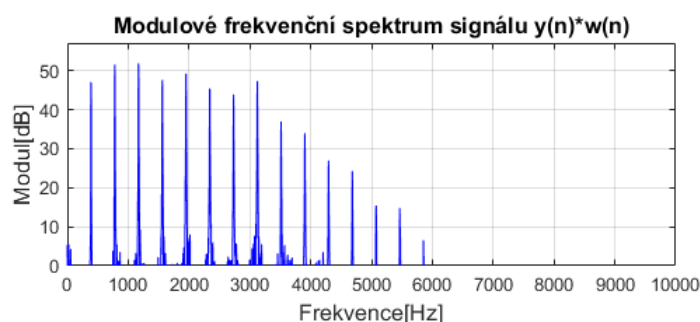
Před analýzou signálu je potřeba vstupní signál upravit tak, abychom jej mohli efektivně vyhodnotit. Jednou z takových úprav, která byla použita, je vynásobení analyzovaného signálu váhovacím oknem.



Obr. 4.2: Aplikace Hannova váhovacího okna na signál $y(n)$.



Obr. 4.3: Spektrum signálu $y(n)$ z obr. 4.2.



Obr. 4.4: Spektrum signálu $y(n)*w(n)$, z obr. 4.2.

Váhovací okno zajistí potlačení negativních jevů ostrých okrajových přechodů v čase při převedení do frekvenční oblasti. Je-li analyzován signál o délce t , tak v čase t_0 může signál začínat a v čase t_{max} končit nenulovou hodnotou. Pak vzniká ostrý přechod. Tyto ostré přechody generují do frekvenční charakteristiky signálu nežádoucí složky a šum. Tento jev se nazývá *prosakování energie do spektra*. Jak vypadá signál po vynásobení Hannovým váhovacím oknem je zřejmé z obr. 4.2. Jak se tato úprava projeví ve frekvenčním spektru, je vidět na obr. 4.3 a 4.4.

Váhovacích oken máme hned několik. Ty se liší tvarem, ale hlavně výsledným spektrálním rozlišením. Podle vizuální analýzy výsledků bylo zvoleno Hannovo okno. Úprava signálu Hannovým oknem v matlabu je naznačena níže:

```
y=y.*hann(length(y))
```

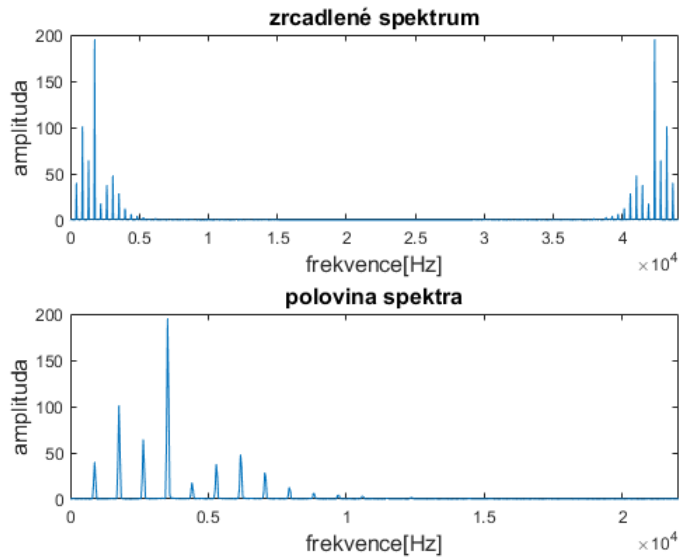
4.2.2 FFT a úprava zobrazení frekvenčního spektra

Pro aplikaci FFT je v matlabu integrovaná funkce *fft*. Tato funkce je základní funkcí celého výpočetního programu této práce. Vstupními daty této funkce je analyzovaný signál, v tomto případě tón dvouplátků. Výstupem funkce jsou spektrální koeficienty. Tyto koeficienty jsou komplexní, je nutné je tedy upravit na reálné koeficienty. K tomu použijeme funkci *abs*, která vrací absolutní hodnotu.

Takto vzniklé spektrum je zrcadlově symetrické podle poloviny vzorkovací frekvence, což je vidět na obr. 4.5. Pro účely této práce je dostačující zobrazení první poloviny spektra, takže je třeba jej upravit. Výsledné spektrum je vidět také na obr. 4.5. Poslední úpravou je zlogaritmování intenzit spektrálních koeficientů. Tím se vytvoří modulové kmitočtové spektrum. K tomu se používá vztah:

$$Mod(Y) = 20\log(Y), \quad (4.1)$$

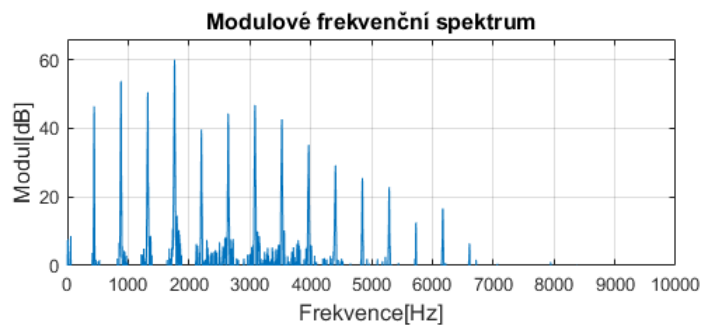
kde Y jsou koeficienty amplitudového spektra. Tyto úpravy jsou provedeny takto:



Obr. 4.5: Zrcadlené a nezrcadlené amplitudové spektrum vstupního signálu.

```
Y=fft(y);
Y=abs(Y);
Y_half=Y(1:length(Y)/2);
Mod=20*log10(Y_half);
```

Výsledné modulové frekvenční spektrum je zobrazeno na obr. 4.6.



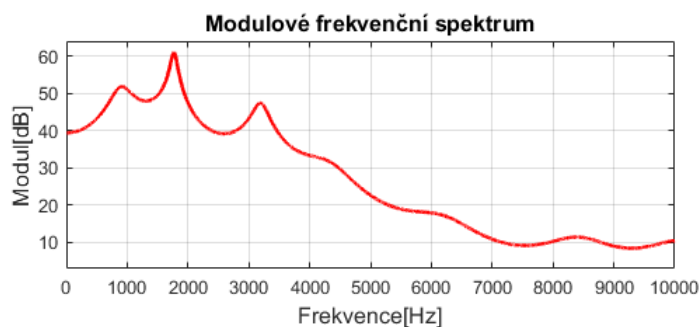
Obr. 4.6: Modulové kmitočtové spektrum.

4.2.3 Implementace LPC

Další součástí matlabovského skriptu je výpočet LPC a formantových oblastí. Tato část skriptu využívá podobné ošetření signálu před výpočtem jako FFT. Je provedeno vynásobení signálu váhovacím oknem, bereme v potaz jen polovinu spektra a

výsledky jsou v logaritmické míře. Níže jsou uvedeny a popsány klíčové příkazy a funkce, které byly použity k realizaci LPC.

```
k=lpc(y,p);           % k-spektrální koeficienty
                      % p-predikční koeficienty
[h,fa]=freqz(1,k,fvz/2,fvz);
                      % fvz-vzorkovací frekvence
```



Obr. 4.7: Obálka spektra.

K výpočtu LPC byla využita integrovaná funkce *lpc*, která funguje na principu autokorelace. Výstupem funkce *lpc* jsou spektrální koeficienty. Z těchto koeficientů se pak pomocí funkce *freqz* vytvoří průběh frekvenční obálky (frekvenční charakteristiky) viz obr. 4.7. Frekvenční obálku ve vztahu k harmonickým složkám frekvenčního spektra lze vidět na obr. 2.4.

Je třeba stanovit počet predikčních koeficientů *p*, které udávají řád LPC. Čím vyšší je počet koeficientů, tím přesněji by měla spektrální obálka kopírovat zvlnění spektra. Při příliš vysoké hodnotě ale zmizí formantové oblasti, proto je třeba si hodnotu řádu LPC dobře rozmyslet.

5 Náběr vzorků

Pro výsledné zkoumání problematiky strojků byl zvolen, jako předmět analýzy, fagot a jeho strojky. Ve studiu Škroupova bylo provedeno nahrávání zvukových vzorků. Prostory pro nahrávání poskytl vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.. Vzorky byly nahrány v akusticky upravené komoře, která slouží především pro nahrávání mluveného slova. Tato komora má velmi krátký dozvuk, je tedy možné dosáhnout dobrého poměru přímého zvuku ku odraženému, a zachovat tak vysokovou vypovídající hodnotu nahraných vzorků. Nahrávaným nástrojem byl fagot s 11 různými strojkami.

5.1 Použitá technika, způsob snímání, technické parametry

Pro měření fagotu byly použity dva měřicí mikrofony DBX, které byly rozmístěny tak, aby pokryly rovnoměrně vyzařování všech tónů nástroje. Zvuk byl nahráván do DAW Cubase 8 s vzorkovacím kmitočtem 96kHz.

5.2 Postup nahrávání a postprodukce

Samotné nahrávání probíhalo tak, že interpret doc. Mgr. Roman Novozámský uvedl, o jaký strojek (pořadové číslo, které bylo stanoveno předem) se jedná. Pak s tímto strojkem zahrál řadu tónů, která postupovala střídavě v intervalech kvinta kvarta v celém rozsahu nástroje, nejprve v půlových délkách jednotlivých tónů, a poté stacato. Výběr tónů byl proveden po vzájemné domluvě interpreta, vedoucího práce a autora práce tak, aby nahrané vzorky co možná nejlépe, a přitom univerzálně vystihovaly charakter nástroje ve všech jeho polohách a rejstřících.

Dále interpret zahrál na strojek, který nebyl nasazený na fagot. Nakonec interpret uvedl, o jaký typ strojku se jedná a jaké má vlastnosti. Tyto vlastnosti uváděl na základě subjektivního pocitu, který nabyl při hraní na tyto strojky a při jejich výrobě. Interpret doc. Mgr. Roman Novozámský je zároveň výrobcem těchto strojků.

V rámci postprodukce byla nahrávka rozstříhána na jednotlivé vzorky. Vzorky nebyly jinak upravovány, aby zůstala zachována jejich vypovídající hodnota.

6 Vyhodnocení výsledků

V této kapitole jsou popsány způsoby hodnocení vlastností strojků fagotu. Výsledky jsou dány do souvislosti s teoretickými předpoklady, s popisem strojku podle interpreta a se závěry jiných studií, a tyto výsledky jsou komentovány.

6.1 Stanovení metod a kritérií

Nejdříve byly stanoveny základní metody a kritéria pro hodnocení. Bylo nutné stanovit si, které informace jsou pro tuto práci důležité a co je potřeba zjistit. Napříč všemi těmito metodami je jednotícím prvkem metoda dedukce, která využívá všech vstupních dat od frekvenčního spektra až po níže zmíněné metody.

6.1.1 Střída a doba otevření strojku

Jak již bylo popsáno v kapitole 3, je očekáváno, že časový průběh rezonance strojku jsou periodicky se opakující pulzy. Pro takový signál a jeho popis je důležitým parametrem střída. Jak takovou střidu pomocí autokorelace a reálného kepstra přibližně odhadnout, bylo už ve výše zmíněné kapitole popsáno. Ve skutečnosti je pro nás zásadní šířka pulzu, neboli doba otevření strojku, kterou ale lze ze známé střidy snadno dopočítat.

Je známo, že pokud má střída hodnotu $1 : x$, pak doba otevření strojku je dána $\tau = T/x$, kde T je perioda signálu. Na základě této znalosti byly dopočítány odhady doby otevření pro všechny vzorky jednotlivých strojků. U každého strojku bylo naměřeno celkem čtrnáct vzorků, kdy sedm z nich bylo zahráno dlouze a sedm krátce. Podle teoretických předpokladů je očekáváno, že doba otevření strojku je neměnná napříč rozsahem nástroje. Proto, pro zvýšení přesnosti odhadu doby otevření, byl vypočítán z těchto výsledků aritmetický průměr, kdy nebyly brány v potaz krajní hodnoty (jak minimální, tak maximální). Výsledek tohoto průměru je hledaný odhad doby otevření strojku.

6.1.2 Rezonance ve strojku

Další metoda, která byla ke klasifikaci strojků využita, vycházela ze závěrů studie *Vibrations Modes of an Uilleann Pipe Reed*[15]. Tato studie měří prvních pět rezonančních módů strojku pomocí laserového Dopplerova velocimetru. V této studii měřili strojek irských dud, který je svými rozměry velmi podobný strojku fagotu, takže je předpoklad, že se strojky použité pro účel této bakalářské práce, budou chovat podobně.

Tyto závěry byly dány do souvislosti se subjektivním vnímáním strojku interpreta. Zkušený interpret dokáže dobře rozpoznat, jak se rezonance ve strojku šíří, a takové dovednosti jsou k této metodě vyhodnocování využity.

6.2 Přehled strojků

Ke zkoumání bylo vybráno jedenáct strojků fagotu, které mají různé velikosti, mechanické vlastnosti a liší se například i v druhu omotávky. Jako omotávka jsou použity tři různé materiály: motouzový provázek, PLA 3D tisk a smršťovací bužírka. Tyto různé materiály omotávky strojku jsou patrné na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Strojek 1 - motouzový provázek, strojek 4 - smršťovací bužírka, strojek 8 - PLA 3D tisk.

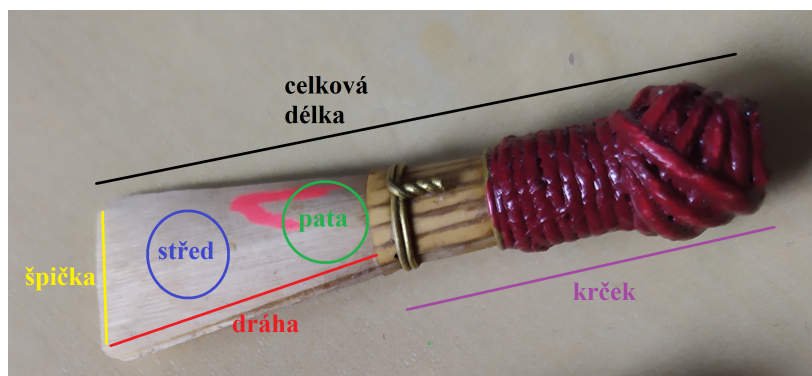
Používané strojky byly výrobcem změřeny pomocí mikrometru. Tyto rozměry, včetně použitého materiálu na omotávku, jsou vypsány v tabulce 6.1. Rozměry délka (myšleno jako celková délka strojku), krček a dráha jsou rozměry odpovídající délce dané části. Špička, střed a pata označují tloušťku plátku v těchto místech. Všechny tyto rozměry se udávají v milimetrech. Kde se jednotlivé výše zmíněné části strojku nacházejí, je vidět na obr. 6.2.

Špička je nejtenčí část plátku. Je to první část, která přichází do kontaktu s vháněným vzduchem a jako první začíná rezonovat. Je to část strojku, která se střídavě zavírá a otevírá, tzn. že je to část, která udává střídu strojku. Velikost otevření špičky je dána amplitudou fundamentu. Střed je část strojku, která se dělí na srdce, které je uprostřed, a okna, která jsou po bocích. Tyto části se střídavě nafukují a splaskávají podle amplitudy zejména prvních pěti vyšších harmonických

složek. Tloušťka a pružnost středu tak zásadně ovlivňují kvalitu tónu. Pata je část plátků, která předchází krčku. Tato část je nejsilnější a i vzhledem k pozici nejhůře rezonuje. Osa procházející středem plátku se nazývá páteř. Krček je část, která drží plátky pohromadě. Krček je stažen omotávkou, nejtypičtěji motouzovým provázkem, ale jak už bylo zmíněno, mohou se používat i jiné materiály.

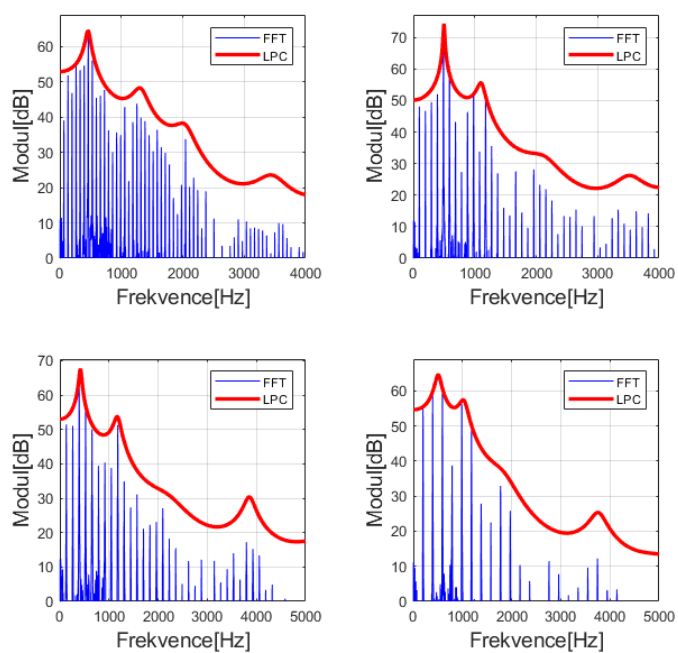
Strojek	délka	krček	dráha	špička	střed	pata	omotávka
1	56,12	30	26,12	0,2	0,68	0,9	motouz
2	54,75	29	25,75	0,15	0,67	1	motouz
3	53,63	29	24,63	0,13	0,61	0,98	motouz
4	57,28	29	28,28	0,25	0,82	1,2	bužírka
5	55,84	29	26,84	0,12	0,7	1,15	bužírka
6	56,29	29	27,29	0,3	0,75	1,1	motouz
7	55,7	29	26,7	0,15	0,72	0,95	motouz
8	55,43	29	26,43	0,2	0,75	1,05	PLA
9	56,52	29	27,52	0,28	0,78	1,1	PLA
10	56,41	29	27,41	0,25	0,77	1,1	PLA
11	55,81	28	27,81	0,11	0,7	1,05	motouz

Tab. 6.1: Přehled rozměrů vybraných strojků v milimetrech.

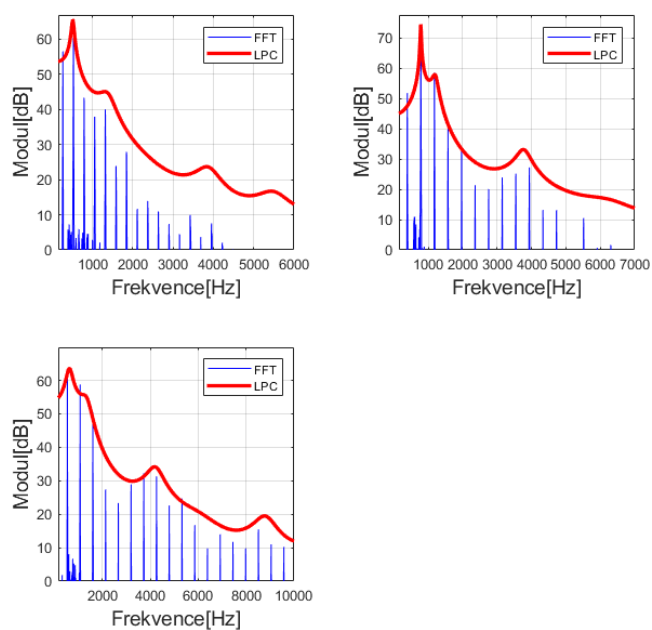


Obr. 6.2: Strojek s popisky jednotlivých částí.

Na obrázcích 6.3 a 6.4 jsou pak zobrazena modulová frekvenční spektra s FFT a LPC všech sedmi vzorků tónů strojku 1. Řád LPC je pro spodní dva tóny roven stu, pro další dva tóny osmdesáti, pro c' a g' šedesáti a pro c'' je tento řád roven 40. Spektra dalších strojků jsou v příloze.



Obr. 6.3: Spektra strojku 1, tóny zleva po řádcích: **C**, **G**, **c**, **g**.



Obr. 6.4: Spektra strojku 1, tóny zleva po řádcích: **c'**, **g'**, **c''**.

6.3 Vyhodnocení strojků

6.3.1 Diskuse o době otevření

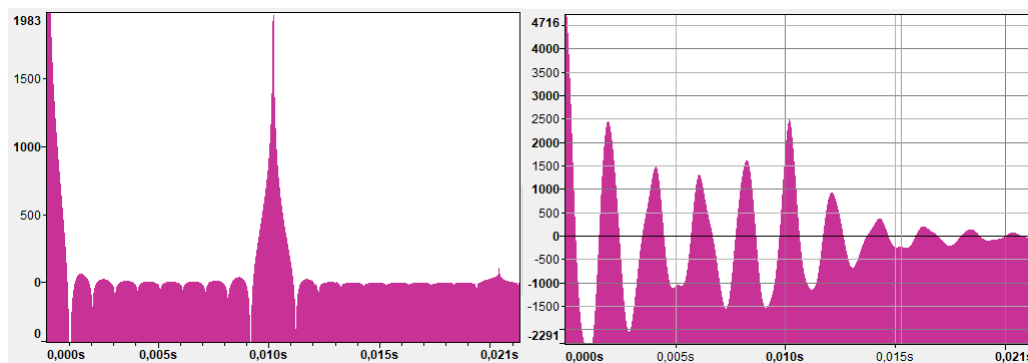
První strojek je strojek s motouzovou omotávkou a rozměry viz tabulka 6.1. Podle analýzy pomocí autokorelace byla odhadnuta doba otevření strojku τ . Jednotlivé doby otevření strojku, které byly odhadnuty podle postupu, který je popsán v kapitole 3.4, jsou vypsány v tabulce 6.2. Z těchto dat odečteme horní a dolní extrémy a vypočítáme aritmetický průměr. Výsledná doba otevření je pak rovna $\tau = 0,00101s$. Porovnání autokorelace tónu strojku a autokorelace generovaného pulzního signálu se stejnou střídou a stejným kmitočtem, je vidět na obr.6.5. Zásadní poměry se odvíjí od krajních minim autokorelace.

V tabulce lze pozorovat, že doba otevření pro dlouhé a krátké tóny o stejné výšce vychází prakticky stejně. Z tohoto důvodu je možné pro další výpočty aritmetického průměru doby otevření vzít v potaz pouze jednu skupinu tónů, to znamená buďto dlouhé nebo krátké tóny.

Vzorek	Tón	T [s]	τ [s]
1 (dlouze)	C	0,0152	0,00108
2 (dlouze)	G	0,0102	0,00102
3 (dlouze)	c	0,0076	0,00127
4 (dlouze)	g	0,0051	0,00102
5 (dlouze)	c'	0,0038	0,00095
6 (dlouze)	g'	0,0025	0,00063
7 (dlouze)	c''	0,0019	0,00063
8 (krátce)	C	0,0156	0,00111
9 (krátce)	G	0,0102	0,00102
10 (krátce)	c	0,0077	0,00128
11 (krátce)	g	0,0050	0,001
12 (krátce)	c'	0,0038	0,00095
13 (krátce)	g'	0,0025	0,00063
14 (krátce)	c''	0,0019	0,00063

Tab. 6.2: Strojek 1 - doby otevření strojku vybraných tónů.

Další jev, který lze pozorovat, je velké snížení doby otevření od tónu **g'** výš. Na dalších strojcích budeme pozorovat, jde-li o opakovaný jev nebo se jedná o vlastnost konkrétního strojku. Každý nástroj může reagovat na určité vlnové délky tak, že prudce změní svoje vlastnosti, například vlivem prudké změny akustické impedance. To se ve strojku může projevit změnou jeho rezonančních módů, a tím i



Obr. 6.5: Porovnání autokorelací tónu velké **G** simulovaného signálu a strojku 2.

časového průběhu strojku. Stejně tak nemusí být tento jev závislý na mechanických vlastnostech nástroje, ale pouze na vlastnostech strojku, který reaguje na změnu vlnové délky nebo impedance.

Mylné úvahy o době otevření strojku

Při výpočtu doby otevření dalších strojků bylo zjištěno, že úvahy o tomto parametru strojku, které byly stanoveny v předchozích kapitolách, byly částečně mylné.

Bylo zjištěno, že všech jedenáct strojků má přibližně stejnou průměrnou dobu otevření, čili i střídu. Je možné, že je to způsobeno hned několika důvody, které jsou popsány níže.

Nesprávná analýza autokorelace a kepstra. Tento závěr je nepravděpodobný, protože při generování simulovaného signálu se potvrdila spojitost mezi poměry v autokorelaci a střídou, která byla stanovena v kapitole 3.

Navíc přibližná tendence ve spektru, která platí pro obdélníkový signál, čili chybějící harmonická složka odpovídající střídě, je přinejmenším patrná a víceméně odpovídá odhadované době otevření strojku. Z toho vyplývá, že spektra všech strojků si jsou velice podobná, liší se především výkonově. To znamená, že energie vyšších harmonických u některých strojků klesá rychleji než u jiných. Některé strojky mají v určitých formantech vyšší energii, a tím je podpořena charakteristická barva tónu daného strojku. To by mohly být skutečné rozdíly mezi různými jakostmi strojků, viz další odstavce.

Úvaha o tom, že délka otevření závisí na jakosti nebo hbitosti strojku, není správná. Úvaha o tom, že hbitý, nebo také měkký strojek, má kratší dobu otevření tak neodpovídá realitě, protože strojky, které interpret označil jako měkké nebo pružné, mají stejnou dobu otevření, jako strojky středně tvrdé nebo tvrdé. Rozdíl mezi různými tvrdostmi by mohl odpovídat rychlosti klesání energie na vyšších harmonických nebo vnitřním jevům uvnitř strojku. To znamená nafukováním a

rezonováním jednotlivých částí strojku, doléháním špičky a dalších jevů.

Tyto vlastnosti lze popsat také výrazem hloubka střidy, tzn. jak velký odstup má fáze zapnuto od fáze vypnuto a jak moc je fáze vypnuto zvlněná.

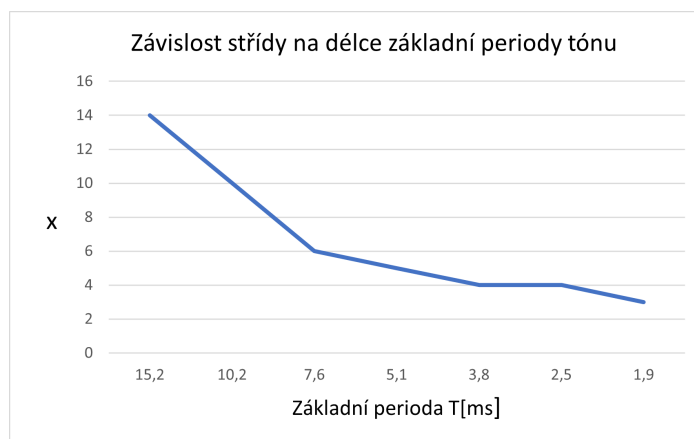
Doba otevření strojku je závislá na nástroji. Je pravděpodobné, že dobu otevření strojku přímo ovlivňuje nástroj, v tomto případě fagot. Ze vzorků, které byly nahrány jako samostatné strojky nenasazené na nástroj (dále nezatížený strojek), bylo zjištěno, že se doba otevření strojku liší od strojku, který je na fagot nasazen.

Nezatížené strojky, které se podařily nahrát zněle, tzn. objevuje se v nich tón a ne pouze šum a inharmonický pískot, opět mají přibližně stejnou délku otevření, která je přibližně poloviční jako u strojku zatíženého.

Další jev, který se v tomto ohledu objevil je, že se strojek při překročení určitého kmitočtu začne chovat jako nezatížený. Takový kmitočet můžeme označit jako *mezní kmitočet*. Tento jev je vidět v tabulce 6.2, kde na tónu **g'** dochází ke zkrácení doby otevření na polovinu, což odpovídá době otevření nezatíženého strojku. Tento jev se opakuje pro všechny měřené strojky, čímž je zodpovězena otázka, která vyvstala při pozorování tohoto jevu u prvního strojku.

Doba otevření nezatíženého a následně zatíženého strojku je závislá na rukopisu výrobce. To je jedna z úvah, která by vysvětlovala, že strojky mají v tomto ohledu všechny podobný charakter.

Rukopisem výrobce se myslí schopnost dosažení podobného výsledku (stejná doba otevření strojku) na základě zvukových preferencí výrobce. Tuto úvahu nelze potvrdit, protože nemáme k dispozici vzorky se strojkem jiného výrobce.



Obr. 6.6: Graf závislosti střidy na délce periody.

V této části byly zavedeny nové pojmy – zatížený strojek, nezatížený strojek a mezní kmitočet strojku. Zatížený strojek má konstantní dobu otevření přibližně o délce 1ms. Nezatížený strojek (nenasazený na nástroj) má konstantní dobu otevření

strojku přibližně 0,5ms. Mezní kmitočet strojku je kmitočet odpovídající výšce tónu, kdy se chování strojku, co se týče doby otevření, změní ze zatíženého na nezatížený. Tím pádem se změní doba otevření strojku na polovinu, a v tom případě se poměr střídý opět zvýší. Na obr. 6.6 je vynesena do grafu závislost délky střídý na periodě tónu. Kdy se střída vypočítává jako $1/x$, kdy právě tato x jsou vynesena na svislé ose grafu.

6.3.2 Jakost strojku

Interpret popsal svoje subjektivní pocity, které při hraní na strojek a při výrobě daného strojku nabyl. V této části je věnována pozornost především vyjádřením o tvrdosti strojků. V tabulce 6.3 jsou tvrdosti, které interpret strojkům přiřadil, vypsány. Strojky řadíme do tří kategorií podle tvrdosti: měkký, středně tvrdý, tvrdý.

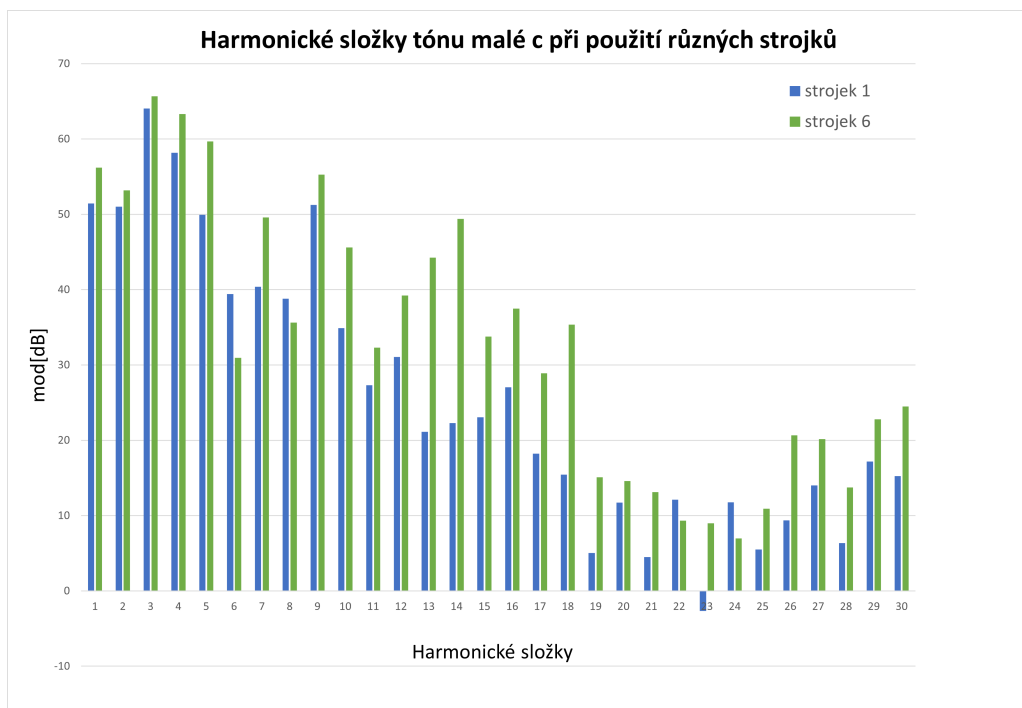
Strojek	Tvrdost	Strojek	Tvrdost
1	měkký	7	středně tvrdý
2	středně tvrdý	8	měkký
3	středně tvrdý	9	tvrdý
4	tvrdý	10	středně tvrdý
5	tvrdý	11	měkký
6	tvrdý		

Tab. 6.3: Přehled tvrdostí použitých strojků podle subjektivních pocitů interpreta.

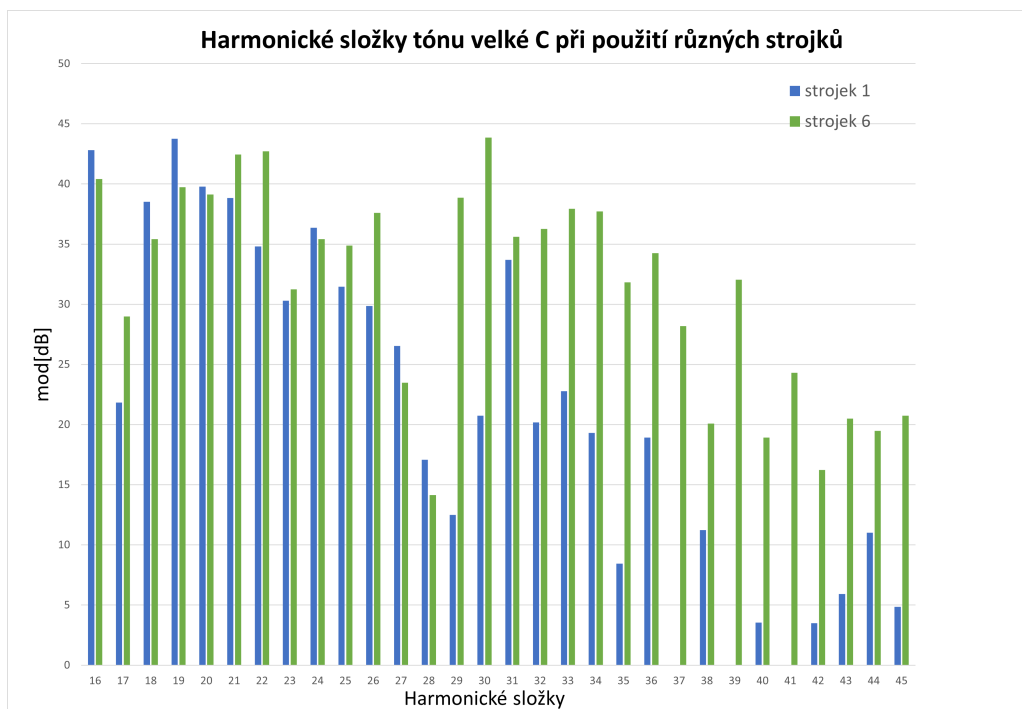
Tato klasifikace strojku byla podrobena zkoumání. Jeden z předpokladů, který se k tvrdosti strojků vztahuje je, že *měkčí strojek rychleji ztrácí energii na vyšších harmonických, než strojky středně tvrdé nebo tvrdé* [14]. Na obrázku 6.7 je vidět srovnání prvních 30 harmonických složek tónu malé **c** zahráných na strojek 1 a strojek 6, který interpret označil jako nejtvrďší z daných vzorků.

Z obrázku lze mimo jiné pozorovat, že energie vyšších harmonických složek prvního strojku je nižší než energie strojku 6. Tato tendence jde zřetelně pozorovat ve formantové oblasti už od cca 10. harmonické. Čím širší spektrum daného tónu je, tím později se tento jev začne projevovat. To lze pozorovat na srovnání stejných strojků na obr. 6.8, kde je vidět srovnání 16.-45. harmonické složky tónu velké **C**. Prvních 15. harmonických je, co se energie týče, poměrně vyrovnaných. Rozdíl je možné zřetelně pozorovat právě až od cca 29. harmonické.

Při porovnání spekter a barvy tónů tvrdých strojků je to právě tato první formantová oblast, která dělá zvuk strojku agresivním. A právě tato formantová oblast je u tvrdých strojků výrazně silnější než u strojků měkkých. Tento fakt byl ověřen pomocí ekvalizéru. V DAW Reaper byla pomocí ekvalizéru, pluginy F6 od Waves,



Obr. 6.7: Porovnání spekter tónu **c** s různě tvrdými strojků.



Obr. 6.8: Porovnání spekter tónu velké **C** s různě tvrdými strojků.

s funkcí RTA (Real Time Analyzer), vyhledána tato formantová oblast a utlumena zhruba o 6dB. Výsledek byl, že se agresivita tónu výrazně snížila a tón se pocitově zakulatil. To platí především pro spodní rejstříky nástroje. Na vyšších tónech nástroje už takový vliv tohoto formantu na barvu nebyl pozorován. Ukázky dvou tónů, na které byl aplikován tento postup, jsou i s porovnáním s neupraveným tónem v příloze této práce. Ekvalizér aplikovaný na tón fagotu je vidět na obr. 6.9.

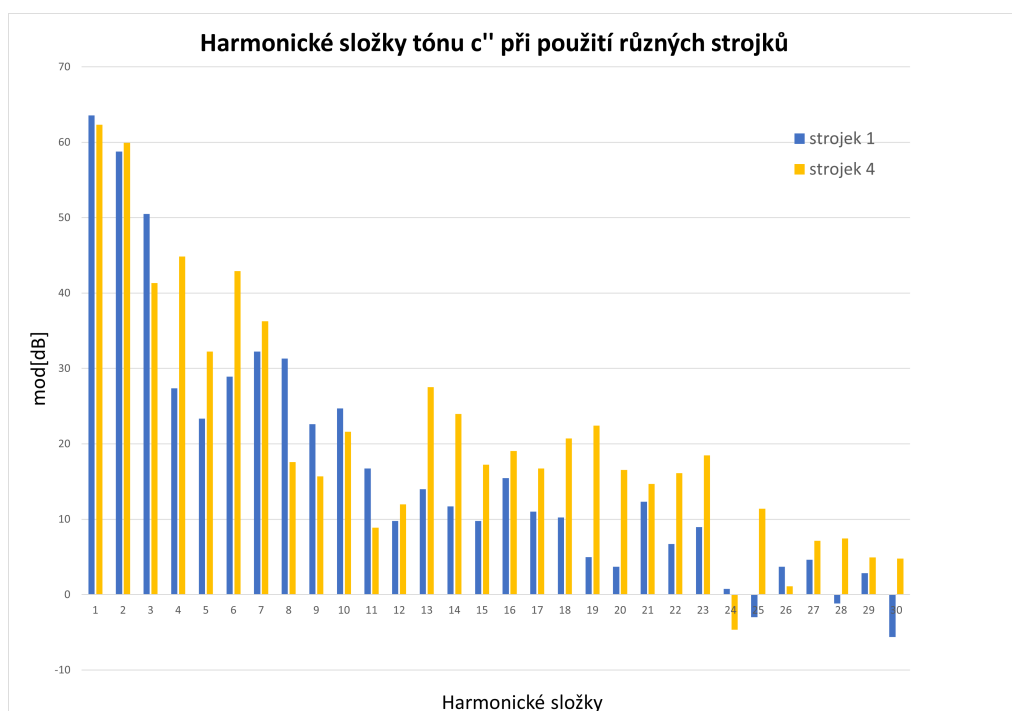


Obr. 6.9: Plugin ekvalizér F6 od Waves aplikovaný na tón C při použití strojku 6.

Stejným způsobem funguje logicky i opačný postup. To znamená, že při aplikaci ekvalizéru na tón měkkého strojku, při zesílení daného pásma, strojek získá agresivnější a méně kulatější tón. Z toho plyne zásadní ponaučení pro interprety a hráče na dvouplátkové dechové nástroje. Pokud chtějí neagresivní jemný tón, tak musí sáhnout spíše po měkkých strojcích. Takový strojek se bude lépe pojít do harmonie a tvořit plochy. Pokud interpreti požadují agresivnější a průraznější zvuk, měli by sáhnout po tvrdších strojcích. Takový strojek se lépe prosadí, a proto je vhodný především při použití dvouplátku jako sólového nástroje. Zároveň je třeba hledat i kompromisy, protože příliš tvrdý strojek je zároveň hůře ovladatelný, reaguje až na velkou sílu dechu, a proto je nemožné na takový strojek hrát například v dynamice piano. Příliš měkký strojek je sice snadno ovladatelný, rychle spouští (tzn. začíná kmitat při malém proudu vzduchu), ale nedokáže zahrát velké dynamiky a na silný proud vzduchu nedokáže reagovat. Obecně tedy platí, že čím tvrdší strojek je, tím agresivnější zvuk má. Naopak, čím je strojek měkký, tím je výsledný tón méně výrazný.

Dalším tvrzením, který ve spojitosti s tvrdostí interpret zmínil je, že tvrdé strojky mají špatný ozev na horních tónech. Nejvýrazněji to interpret pocítil na strojku číslo

4. Kmitočtové spektrum tohoto strojku na tónu c'' je opět porovnáno se strojkem 1. Toto srovnání je vidět na obr. 6.10.



Obr. 6.10: Porovnání spekter tónu c'' s různě tvrdými strojky.

Opticky se může zdát, že harmonické složky strojků jsou vyrovnanější než tomu bylo například u tónu malé c . Pořád ale tvrdý strojek (strojek 4), co se energie ve spektru týče, vede. Při spočítání průměrné energie těchto spekter se dokonce poměr energií těchto strojků pro různé tóny prakticky nemění. Zatímco u tónu c byla průměrná energie strojku 4 větší cca o 21%, tak u tónu c'' je to dokonce 28%. Tyto poměry zůstávají řádově stejné při porovnání všech vzorků měkkých a tvrdých strojků.

Na druhou stranu, podle studie (ze které je také čerpáno), která se věnuje rezonancím strojku irských dud [15], je dokázáno, že čím vyšší kmitočet tón má, tím více rezonance postupují pouze středem podél páteře strojku. Aby tyto rezonance mohly volně postupovat, je nutné, aby došlo ke zbroušení krajů plátku, a tím se strojek stává měkčím. Naopak hluboké tóny značně využívají k rezonancím boční části plátku, takže je žádoucí, aby tyto části byly přiměřeně tlusté. Bohužel ve spektru tento jev není patrný a z tohoto pohledu jej nelze potvrdit. Je tedy možné, že tento jev ozev tónu neovlivňuje, nebo alespoň ne tak, jak bylo předpokládáno.

Podle Malého slovníku základních pojmů z hudební akustiky a hudební elektroniky [16] je ozev tónu definován takto: *Ozev tónu (zvuku) – energetická náročnost tvorby tónu (požadovaných vlastností) z pozice hráče na hudební nástroj.* [16] Z toho

	Tvrdost	Spouštění	Ozev	Rezonance na plátku	Barva	Dyn. rozsah
1	měkký	velmi lehké	-	dobře šířící	měkká, nevýrazná	malý
2	středně tvrdý	lehce pozdní	-	dobře šířící	-	dobrý
3	středně tvrdý	lehce pozdní	-	dobře šířící	měkký v horní oktávě	-
4	tvrdý	pozdní	nahoře špatný	nevýrazná	agresivní, kovový, tenký	-
5	tvrdý	pozdní	nahoře špatný	nevýrazná	lehce měkčí než str. 4	-
6	velmi tvrdý	velmi pozdní	-	dobře šířící		špatný v malé dyn.
7	středně tvrdý	lehce pozdní	nahoře špatný	-	spíše agresivní	dobrý
8	měkký	velmi lehké	-	husté po celé ploše	temnější tupější	dobrý
9	tvrdý	velmi pozdní	nahoře špatný	řídce kmitající	zvučný až agresivní	-
10	středně tvrdý	lehce pozdní	-	dobře šířící	-	dobrý
11	měkký	velmi lehké	-	dobře šířící	vyrovnaný	dobrý

Tab. 6.4: Přehled vlastností strojků podle pocitů interpreta.

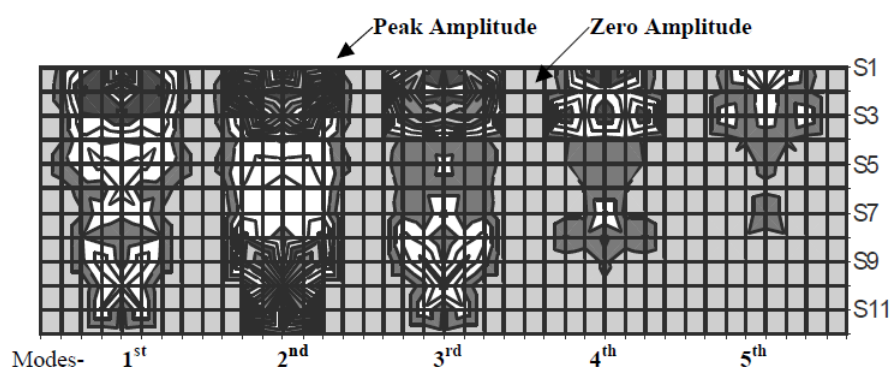
vyplývá, že je to pro tuto práci těžko měřitelná veličina, která nijak nesouvisí se spektrem nebo autokorelací. Pokud hudebník vnímá, že nástroj má nižší ozev, tak musí vyvinout větší úsilí, aby jej vytvořil tak, jak si představuje. V případě těchto strojků tak musí interpret větší silou vhánět zvuk do strojku. Výsledkem je pravděpodobně větší ztráta energie ve spektru, pokud tak interpret neučiní. Z pohledu strojku se to zdá být logické, protože tvrdý strojek bude potřeba vybudit větší energií, aby dokázal kmitat na tak vysokých frekvencích. To by vysvětlovalo, proč interpret uváděl, že ozev tónu je problematický v horních polohách téměř výhradně tvrdých strojků. Další přímá informace, která z toho plyne, je to, že se tak snižuje možnost pracovat na těchto tónech s dynamikou.

Podobným parametrem je rychlost spouštění strojku, která má opačný charakter. Rychlost spouštění je subjektivní údaj o množství energie, kterou musí interpret

vyvinout k tomu, aby strojek začal kmitat. Opět je pozdní spouštění strojku charakteristické pro tvrdší nebo tužší strojky, které kladou větší odpor. Proto je nutné vyvinout větší sílu vháněného vzduchu, aby bylo možné strojek rozkmitat.

6.3.3 Hloubka střidy, rezonance strojku

V již výše zmíněném zdroji [15] jsou změřeny amplitudy prvních pěti harmonických složek napříč celým strojkem. Na obr. 6.11 je vidět výsledek jejich měření, kdy jsou na diagramech zobrazeny amplitudy jednotlivých rezonančních módů uvnitř strojku.

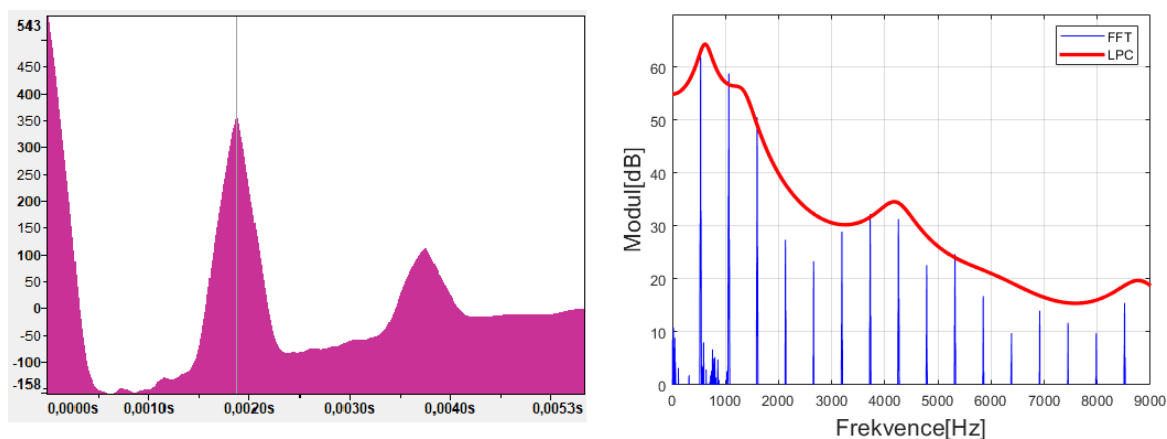


Obr. 6.11: Rezonanční módy strojku. Převzato z [15].

Jedná se o rezonanční módy tónu **d'** o frekvenci fundamentu 293Hz. Lze pozorovat, kde se nacházejí největší amplitudy. U prvních třech módů je velká amplituda obzvláště v okolí špičky, oken a srdce strojku. Poměrně výrazná rezonance je na prvních třech módech i u paty strojku, to znamená v bodech odpovídajících řádkům S9 až S11. Naopak, při rostoucí frekvenci módu se amplitudy stahují do středu strojku a směrem ke špičce. Na patě už nerezonuje téměř nic.[15]

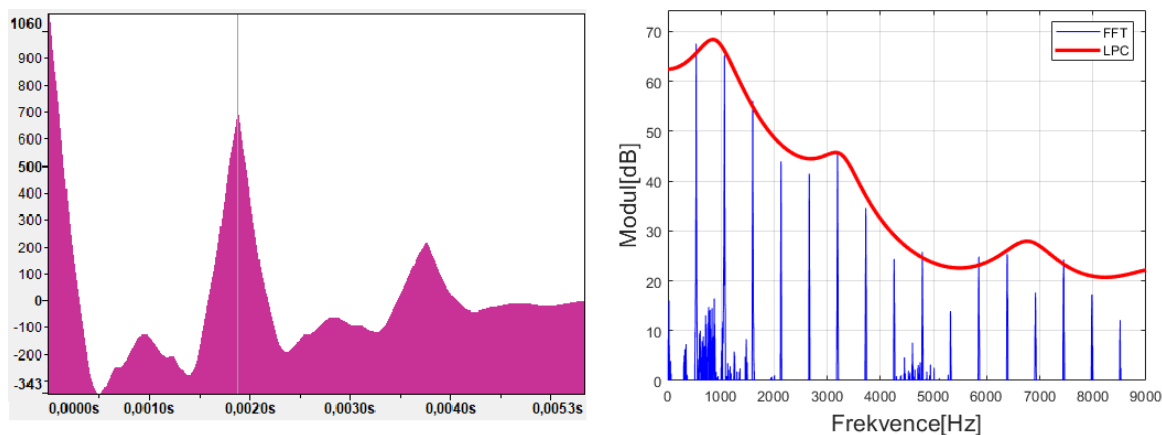
Z toho lze vydedukovat pro tuto bakalářskou práci hned několik důležitých poznatků. Prvním takovým poznatkem je, že pokud dochází k výraznému nafukování oken, tak se to projeví na hloubce střidy signálu. Děje se tak proto, že tato amplituda ovlivní výrazně tvar výsledného signálu. Je velmi pravděpodobné, že tak učiní každá amplituda, která je větší než fundament tónu. Vztaheno k vzorkům strojků této práce to znamená, že hloubka střidy je dána velikostí všech harmonických složek, které dosahují větších amplitud než fundament.

Na obr. 6.12 je vidět autokorelace, která má v bodě kurzoru maximum. To je bod v čase přibližně 0,0019s. Toto maximum označuje délku periody analyzovaného tónu. Hloubka střidy je dána prokmity mezi prvním maximum v čase 0 a tímto druhým maximum označujícím jednu periodu. Lze pozorovat, že prokmity v tomto úseku prakticky žádné nejsou. Při porovnání s frekvenčním spektrem tónu, které je na



Obr. 6.12: Porovnání autokorelace a spektra tónu **c** strojku 1.

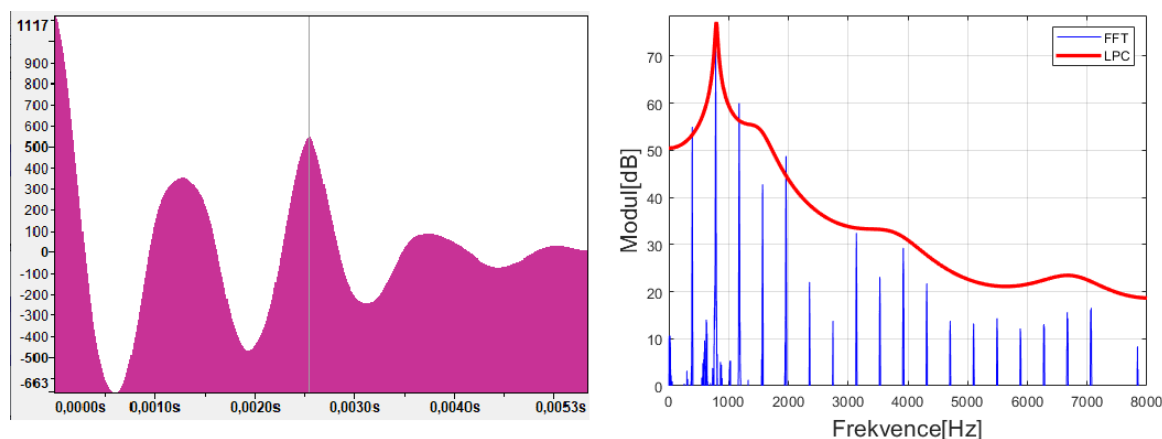
stejném obrázku vpravo, můžeme vidět, že druhá harmonická složka dosahuje menší amplitudy než fundament a totéž platí pro další složky. To ve výsledku znamená, že ve strojku vlivem amplitud vyšších harmonických téměř nedochází k nafukování oken a dalších částí strojku, a proto je hloubka střidy v podstatě maximální. To potvrzuje obr. 6.13, kde je stejné vyzobrazení tónu **c** jako tomu bylo u obr. 6.12, ale pro strojek 6.



Obr. 6.13: Porovnání autokorelace a spektra tónu **c** strojku 6.

Na tomto obrázku lze pozorovat, že hloubka střidy se nepatrně zmenšila, protože uprostřed vzniklo nové lokální maximum. To je dáno tím, že druhá harmonická je svojí amplitudou blíže fundamentu. Rozdíl mezi první a druhou harmonickou u strojku 1 je přibližně 5dB, u strojku 6 je tento rozdíl pouze 2,5dB. To znamená, že už zde dochází pravděpodobně k výraznějšímu nafukování postranních oken a

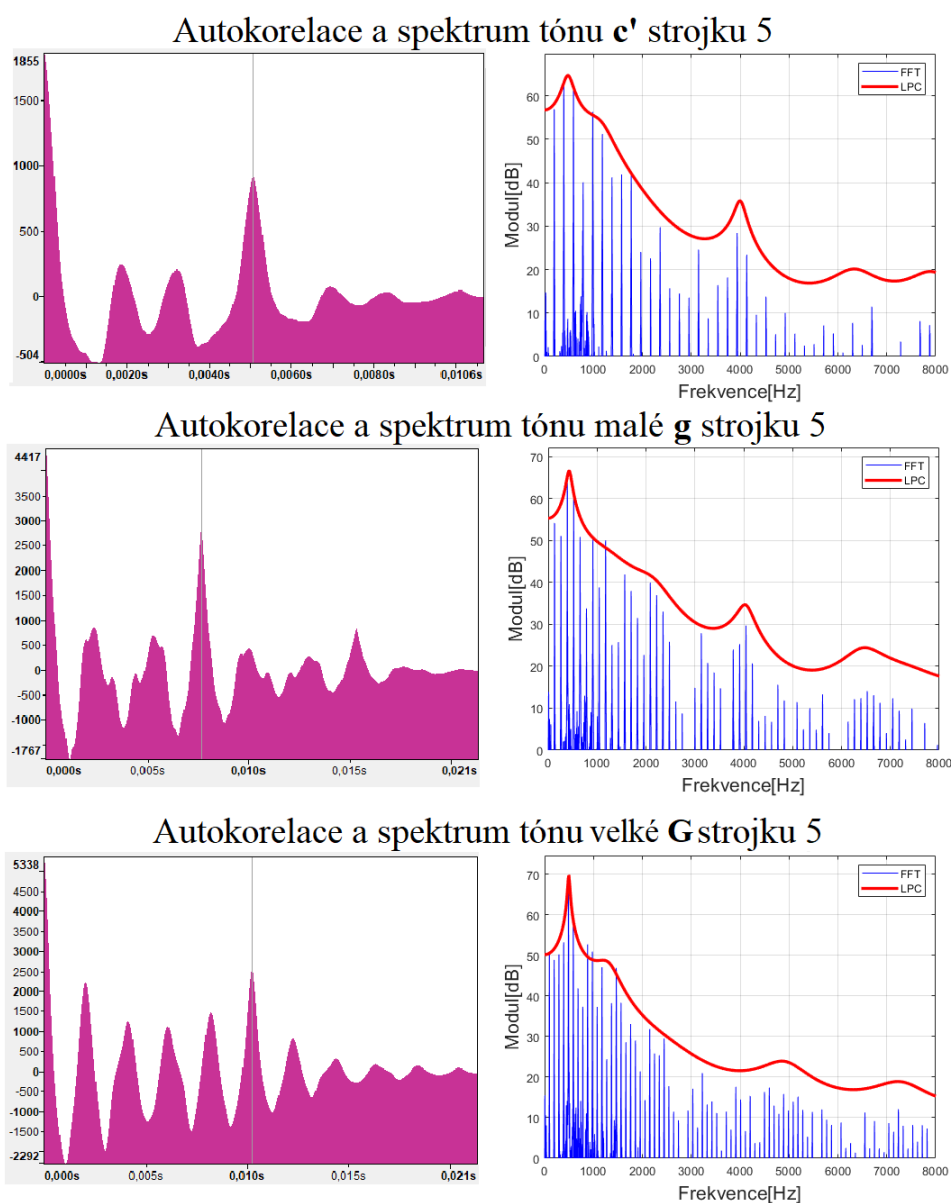
středu, tudíž i ke změně hloubky střidy. Ale vzhledem k tomu, že je amplituda 2. harmonické pořád nižší, tak projev tohoto jevu ve střídě není nijak zásadní.



Obr. 6.14: Porovnání autokorelace a spektra tónu g' strojku 5.

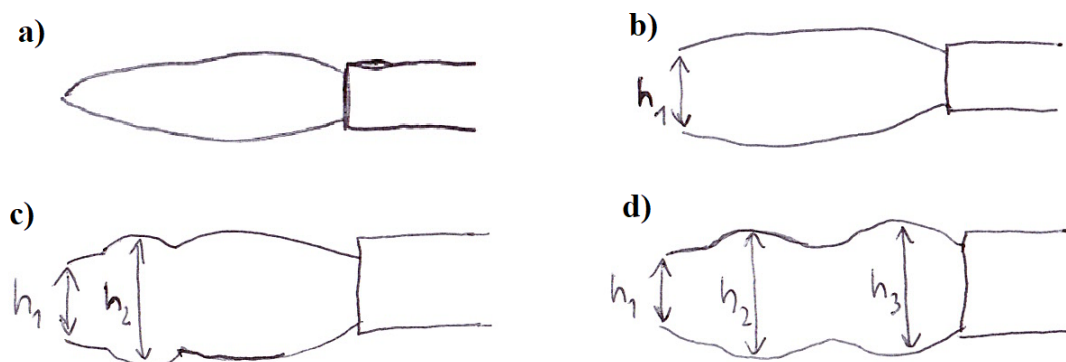
Výraznou změnu v hloubce střidy pak lze vidět na obr. 6.14, kde maximum v čase 2,5ms označuje délku periody. Tomuto jevu opět dává vysvětlení kmitočtové spektrum na obrázku vpravo, kde je vidět, že druhá harmonická má výrazně větší amplitudu než fundament. Navíc se k tomu přidává i třetí harmonická, která má amplitudu také větší. Z toho vyplývá, že dílčí nafukování strojku způsobuje nejen druhá harmonická, i když ta výrazně více, ale i třetí harmonická složka. Změny hloubky střidy v závislosti na spektru jsou vidět také na obr. 6.15. Jsou zde porovnané sestupně tři tóny strojku 5, kde je vidět, jak se s přibývajícími harmonickými v prvním pásmu, které jsou zároveň amplitudou podobné nebo větší než fundament, mění počet a velikost maxim v grafu autokorelace, a tím i hloubka střidy signálu. Jak se tyto maximální amplitudy chovají ve strojku je také vidět na obr. 6.16, na kterém je načrtnuto nafukování plochy strojku při pohledu z profilu na průřez strojkem.

Na obr. 6.16 je od ruky načrtnuté, jak vypadá nafukování strojku při maximálních amplitudách, které jsou vidět na diagramech na obr. 6.11. V části a) je vidět pohled z profilu na strojek v klidu. V části b) je vidět otevření strojku a výška h_1 označuje, jak moc se tento strojek otevře. Zároveň také tento parametr odpovídá velikosti amplitudy fundamentu. V části c) vidíme nafouknutí okna vlivem maximální amplitudy v daném místě. To může být způsobeno kteroukoliv harmonickou složkou, pro kterou platí, že má větší nebo podobnou amplitudu jako fundament. Amplituda kmitů v daném místě má velikost shodnou s výškou h_2 . V části d) je pak vidět nafukování paty, jinak platí stejný princip jako u části c). Složky způsobující takové jevy jsou největšími činiteli ovlivňujícími hloubku střidy.



Obr. 6.15: Porovnání autokorelací a spekter různých tónů strojku 5.

V tabulce 6.4, kde je vypsán přehled vlastností strojku podle interpreta, je hodnocena kategorie, která popisuje kvalitu šíření rezonancí po ploše strojku. Pokud se rezonance šíří dobře po ploše strojku, lze výrazné zvlnění díky maximálním amplitudám vyšších kmitů pozorovat podobně, jak na špičce, v oknech a na středu, tak na patě strojku. Přeneseno na diagramy na obr. 6.11, by se maximální amplituda vyšších kmitů strojku chovala jako druhý rezonanční mód na tomto obrázku. Pokud má strojek nevýrazné rezonance na plátku nebo se tyto rezonance špatně šíří, pak amplitudy především na patě strojku nedosahují takových hodnot, v krajním případě se mohou ztrácet úplně. V tomto ohledu je zajímavé, že špatné šíření kmitů



Obr. 6.16: Náčrtek zvlnění strojku vlivem maximálních amplitud.

po ploše strojku je uvedeno především u strojků se smršťovací bužírkou. Bužíрка je velmi pružná, proto je možné předpokládat, že velkou část energie kmitů pohltí.

Shrnutí poznatků o střídě a rezonancích uvnitř strojku

Pro přehlednost je potřeba zrekapitulovat dedukce a zjištění podkapitoly 6.3.3.

- Zvlnění plochy strojku (nafukování středu, oken, případně paty strojku viz obr. 6.11 a zejména 1. až 3. rezonanční mód strojku) vlivem vyšších harmonických nastává tehdy, když amplitudy vyšších harmonických složek dosahují podobné hodnoty nebo větší, než amplituda formantu. Naopak amplitudy složek, které jsou výrazně nižší než amplitudy fundamentu, mají na hloubku střídě minimální vliv (způsobují lehké zvlnění plátku okolo páteře blíže ke špičce strojku viz obr. 6.11 a 5. rezonanční mód, a dále ještě menší amplitudy).
- Střída strojku a především její hloubka je ovlivněna zejména poměrem vyšších harmonických složek, které dosahují maximálních amplitud, vůči fundamentu. Čím větší je negativní poměr fundamentu k vyšším harmonickým, tím je hloubka střídě mělká. Platí i opak, tzn. pokud fundament dosahuje větší amplitudy než vyšší harmonické, a čím výrazněji je převyšuje, tím je hloubka střídě větší.
- Špatné šíření kmitů po ploše strojků je dáno použitými materiály a jejich vlastnostmi a projeví se tak, že velké amplitudy se soustředí na špičku strojku a na střed. Na patě a na bocích strojků jsou kmity utlumeny a amplitudy nedosahují takových hodnot, jako u strojků, kde se rezonance šíří dobře.

7 Rekapitulace výsledků zkoumání a analýzy

V této kapitole se nachází stručný přehled, shrnutí a rekapitulace všech výsledků a dedukcí, kterých bylo dosaženo v této bakalářské práci.

7.1 Střída a doba otevření strojku

Bylo zjištěno, že doba otevření strojku je pro daný nástroj prakticky konstantní a není závislá na jakosti strojku, jak bylo stanoveno v teoretickém úvodu. Střída strojku je tak dána poměrem této doby otevření vůči délce periody.

Co se mění, to je hloubka střídý, a ta je dána poměrem vyšších harmonických složek vůči fundamentu. Čím vyšší amplituda této harmonické složky je, tím více výslednou hloubku střídý ovlivní. Čím vyšší je tento poměr harmonických složek vůči fundamentu, tím je hloubka střídý menší. Hloubka střídý je vidět jako odstup maxim autokorelace od krajních maxim, která ohraničují jednu periodu signálu. Z výše uvedeného se dá dedukovat, že čím menší hloubka střídý je, tím mohutnější a stabilnější tón je.

Zároveň byly stanoveny tři nové pojmy, které se vztahují k době otevření strojku. Zatížený strojek, nezatížený strojek a mezní kmitočet strojku. Bylo totiž zjištěno, že strojek má jinou dobu otevření, pokud je k nástroji připojen (zatížený strojek), než když je rozvibrován samostatně (nezatížený strojek). Doba otevření zatíženého strojku je přibližně dvojnásobná oproti době otevření nezatíženého strojku. Mezní kmitočet pak udává, při jaké frekvenci se strojek připojený k nástroji začne chovat jako nezatížený. To znamená, že po překročení mezního kmitočtu se doba otevření změní na polovinu. Ve vzorcích používaných v této práci mezní kmitočet odpovídal tónu g' .

7.2 Tvrdost strojku

Tvrdost nebo tuhost strojku ovlivňuje z velké části především energetickou náročnost strojku pro vybuzení kmitání v potřebné kvalitě. Energetickou náročnost můžeme také popsat dvěma parametry, kterým říkáme ozev tónu a rychlost spouštění strojku. Ozev je parametr, který určuje především množství energie, kterou interpret musí dodat strojku, aby kvalita tónu neklesla. Rychlost spouštění je zase energetická náročnost strojku pro vybuzení kmitů ve strojku. To znamená, kolik energie musí vhnáným vzduchem interpret strojku dodat, aby vybudil u strojku kmitání.

Další parametr, který je tvrdostí strojku ovlivněn, je barva tónu. Tvrdý strojek má menší útlum vyšších harmonických složek oproti měkčím strojkům. Ve spektru se tento jev projevuje tak, že po vyrovnané části spektra, kdy je energie rozložena

poměrně vyrovnaně napříč strojky, začíná formantová oblast, kde měkké strojky výrazně energeticky ztrácí na strojky tvrdé. To je vidět na srovnávacích obrázcích 6.7 a 6.8 pro strojek 1 (měkký) a strojek 6 (tvrdý). Tato formantová oblast se nachází ve spektru všech strojků, méně či více výrazná dle tvrdosti strojek. Čím více je tato formantová oblast výrazná, tím je tón nástroje agresivnější, kovovější, průraznější. Naopak měkký strojek má barvu tónu měkkou, jemnou, tupou až zastřenou v závislosti opět na velikosti intenzity této formantové oblasti.

Další dílčí cíl, který byl vytyčen, se týkal souvislosti tvrdosti strojek a hloubky střidy. Tento cíl se ale nepodařilo úplně splnit. Z autokorelace se tento údaj nepodařilo vyčíst, ani nijak změřit. Lze tedy jen dedukovat, že tvrdý strojek bude mít mělčí hloubku střidy. A to, protože se formantová oblast, která je pro tvrdý strojek a jeho barvu typická, přičte do poměru vyšších harmonických vůči fundamentu v neprospěch fundamentu. Na druhou stranu, ačkoliv pro barvu zvuku je tento formant klíčový, v součtu energií vůči první formantové oblasti, u které je vliv na průběh autokorelace naprosto viditelný, je tato formantová oblast zanedbatelná. Závěrem této úvahy tak je, že se v této práci nepodařilo ověřit, jaký vliv má tvrdost strojek na hloubku střidy.

7.3 Návaznost práce

Dalším cílem práce bylo mimo jiné stanovit využití a případně nastínit směry, kterými by se dal výzkum strojků zase posunout.

Jedním takovým využitím je pochopení strojek interpretem. Pokud by zajímalo interpreta podrobněji, jak jeho strojek funguje a v čem se liší jednotlivé strojky, případně jak ve strojek fungují jednotlivé procesy a jak se ve spektru projeví odlišná barva strojek, je tato práce poměrně rozsáhlým základním pojednáním o fungování strojek. Podobně tak může sloužit tato práce i výrobcům strojků, kdy může nastínit způsoby měření, nebo potvrdit či vyvrátit určitá tvrzení o strojcích. Navíc (a tato informace padla i ve zdroji [15]) bylo vypracováno mnoho studií o klarinetu a jeho plátku, ale o dvouplátcích tolik materiálů není. Proto tato práce může sloužit jako úvod podrobnějším, a třeba více specializovaným výzkumům a pracím.

V této práci by se dalo určitě dále pokračovat. Jedna z možností, která by přicházela v úvahu, je rozšíření zkoumání na více vzorků strojků, na více fagotů, na větší počet interpretů (jiná kvalita nátisku) a podobně. Další možností je simulace tónu nástroje například pomocí harmonické syntézy, kdy se nasimuluje přesně tón podle harmonických reálného signálu a následně se s úrovní těchto harmonických manipuluje. Díky takové simulaci by se mohlo lépe sledovat, jak se mění střída a barva tónu v návaznosti na autokorelaci a podobně. Také by se dalo replikovat měření ze studie o strojek irských dud [15], která měřila amplitudy kmitů rezonančních módů strojek

pomocí Dopplerova laserového velocimetru, obohacená například o umělá ústa, která budou rezonance ovlivňovat podobně, jako reálná ústa. Nevýhodou tohoto způsobu měření, jak je v této studii uvedeno, je časová náročnost a velké nároky na přesnost, a tím pádem také velká chybovost měření.

Závěr

Finální zkoumání kvality strojku bylo omezeno pouze na zkoumání strojků fagotu, u kterého byl sesbírán maximální možný počet vstupních dat pro podrobnou analýzu práce. Zároveň bylo, po úvaze společně s vedoucím práce, dohodnuto, že se práce bude věnovat podrobněji chování strojků, proto byla vynechána analýza směrovosti nástroje.

Dále bakalářská práce obsahuje základní analýzu signálu nástroje. Bylo zjištěno, že jakost strojku nesouvisí s dobou otevření strojku, čímž byl vyvrácen jeden z původních předpokladů. V této práci bylo stanoveno několik nových objevů, které byly dány do souvislosti s již známými vlastnostmi zkoumaných strojků. Bylo stanoveno, že pro barvu tónu je nejzásadnějším parametrem tvrdost strojku. Také byly prozkoumány rezonance uvnitř strojku, jak kmitá a dýchá, pokud jej vybudí amplituda signálu. Všechny tyto závěry byly v rámci možností dány do souvislosti s autokorelací a se spektrální analýzou signálu, a také se závěry dalších odborných a studentských prací, které se dvouplátkovým nástrojům věnovaly.

Výše zmíněné závěry přiblížily chování strojku a stanovily, za jakých podmínek se tyto vlastnosti dají vyčíst z analýzy signálu a autokorelace. Tato bakalářská práce tak může sloužit jako vhled pro interprety, aby věděli, jak strojek, na který hrají, funguje, a na základě jakých vlastností si mají tento strojek vybírat, aby dosáhli kvality tónu, kterou požadují. Zároveň tato bakalářská práce může sloužit jako základ dalšího a podrobnějšího zkoumání pro další vědecké práce.

Literatura

- [1] The Oboe. In: *HyperPhysics* [online]. Atlanta (Georgia): Georgia State University [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Music/oboe.html#c1>>.
- [2] Cor Anglais. *Philharmonia* [online]. London: Philharmonia, 2020 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<https://philharmonia.co.uk/resources/instruments/cor-anglais/>>.
- [3] Bassoon. *Philharmonia* [online]. London: Philharmonia, 2020 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<https://philharmonia.co.uk/resources/instruments/bassoon/>>.
- [4] Musical Instrument Guide: The evolution, mechanisms, and playing methods of a range of instruments. *Yamaha: Make Waves* [online]. Hamamatsu: Yamaha Corporation [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.yamaha.com/en/musical_instrument_guide/>.
- [5] JIRÁSEK, Ondřej. *Nástroje: Přednáška č.5* [online]. In: Brno: VUT Brno, FEKT, 2012, s. 167 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<https://www.vutbr.cz/studenti/predmety/detail/116657?apid=116657>>.
- [6] REUTER, Christoph a Sandra CARRAL. *On Reeds And Resonators: Possible explanations for cyclic spektral envelopes in the case of double reed instruments* [online]. Stockholm: Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, 2013, 7, [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <https://www.academia.edu/24522206/On_reeds_and_resonators_Possible_explanations_for_cyclic_spektral_envelopes_in_the_case_of_double_reed_instruments>
- [7] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 3. doplněné vydání. Praha: Akademie múzických umění v Praze (Nakladatelství AMU), 2013. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [8] SMÉKAL, Zdeněk. *Analýza signálů a soustav: BASS*. Brno: VUT Brno, FEKT, 2012 [cit. 2020-12-11]. ISBN 978-80-214-4453-9.
- [9] SUCHÁNEK, Tomáš. *Analýza spektra klarinetu od různých výrobců*. Brno, 2019. Bakalářská práce. VUT Brno, FEKT. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

- [10] Oboe. *Philharmonia* [online]. London: Philharmonia, 2020 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<https://philharmonia.co.uk/resources/instruments/oboe/>>.
- [11] JIRÁSEK, Ondřej. *Mikrofony* [online]. In: Brno: VUT Brno, FEKT, 2012, s. 167 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<https://www.vutbr.cz/studenti/predmety/detail/116657?apid=116657>>.
- [12] Strojky hoboje. In: *Hoboj* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://hoboj.estranky.cz/clanky/strojky/>
- [13] Cor Anglais. *stickpng* [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z URL: <<https://www.stickpng.com/img/objects/music/woodwind-instruments/cor-anglais/>>.
- [14] GJEBIC, Julia. *A Study of Oboe Reeds*. Allendale (Michigan), 2013. Student Summer Scholars. Grand Valley State University.
- [15] MURRAY, Patrick. *Vibrations Modes of an Uilleann Pipe Reed* [online]. Medford, Massachusetts, 2002 [cit. 2021-5-25]. Dostupné z: <http://www.tuft1.tufts.edu/musicengineering/research/uilleann_pipes/uilleann_reed.pdf>. Undergraduate Thesis. Tufts University, Mechanical Engineering Department. Vedoucí práce Jesse Jone IV.
- [16] SYROVÝ, Václav a Milan GUŠTAR. *Malý slovník základních pojmů z hudební akustiky a hudební elektroniky*. 3. vydání. Praha: Akademie múzických umění v Praze (Nakladatelství AMU), 2016. ISBN 978-80-7331-383-8.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FT	Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace - Fast Fourier Transform
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
LPC	Lineární prediktivní kódování - Linear predictive coding
Dvoupítky	Dvoupítkové dechové nástroje
DAW	Digital Audio Workstation
A/D převodník	převodník signálu z analogu do digitálu
RTA	Real Time Analyzer
T	Perioda
f_{vz}	Vzorkovací frekvence
τ	Doba otevření strojeku

Přílohy

Elektronická příloha „Priloha_BP_cocev.zip“ obsahuje:

- Program v matlabu ve složce **Matlab**.
- Grafy, obrázky a tabulky ve složce **Grafy**
- Zvukové vzorky měřených strojků ve složce **Zvukove_vzorky**